

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TIPO CARCROSS
MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

AUTOR:

Alberto Jiménez Ramírez

DIRECTOR:

Juan Carlos García Prada

TUTOR:

Álvaro García Menéndez

LEGANÉS, 2010



Agradecimientos.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres toda la ayuda que me han prestado para sacar adelante mis estudios, sin ellos no hubiera sido posible llegar hasta aquí. A mis hermanos y a toda mi familia en general, por su apoyo constante.

Agradecer también a mis primos, Álvaro y Pablo Alonso, la confianza que depositaron en mí a la hora de elegir esta carrera.

A mi tutor, Álvaro García, por el seguimiento al proyecto y la ayuda prestada.

A mis compañeros, Javier Martín y David Juberías, por sus aportaciones al proyecto.

Gracias a Denys, por tantos días de convivencia juntos.

Y por último, gracias a ti, María, por tantas noches de conversación, escuchándome y ayudándome en todos y cada uno de los problemas que han surgido a lo largo de estos 5 años.

- *A ti, María* -



Lista de símbolos.

MEF: Método de los Elementos Finitos

MES: Mechanical Events Simulation

CAD: Computer Aided Design

RFEDA: Real Federación Española De Automovilismo

SEV19: Solid Edge V19

PEW5: Pro Engineer Wildfire 5

SAE: Society of Automotive Engineers

AWS: American Welding Society

WRC: World Rally Championship

F1: Fórmula 1

CC: Corriente Continua

CA: Corriente Alterna



Índice general	Pág.
Agradecimientos.....	1
Lista de símbolos.....	2
Capítulo 1: Objetivos y motivación del proyecto.....	11
Capítulo 2: Introducción.....	13
2.1. Historia.....	14
2.2. Seguridad en la competición carcass.....	15
2.2.1. Chasis.....	15
2.2.2. Casco.....	17
2.2.3. Sotocasco.....	18
2.2.4. Ropa ignífuga.....	18
2.2.5. Hans.....	19
2.2.6. Otros componentes.....	20
2.3. La carrocería y el chasis.....	21
Capítulo 3: Diseño del chasis.....	24
3.1. Criterios de diseño.....	25
3.1.1. Rigidez. Fundamento teórico.....	25
3.1.2. El peso y su distribución.....	28
3.1.3. El espacio.....	29
3.1.4. El coste.....	29
3.2. Algoritmo de diseño.....	30
3.3. Modelado del chasis.....	31
3.3.1. Boceto del piloto.....	31
3.3.2. Arco delantero.....	32
3.3.3. Barras de unión del arco delantero con el arco central.....	36
3.3.4. Barras longitudinales.....	37
3.3.5. Arco central.....	38



3.3.6. Semiarcos traseros.....	38
3.3.7. Semiarcos intermedio y delantero.....	39
3.3.8. Barras longitudinales laterales.....	40
3.4. Fabricabilidad del diseño y proceso de fabricación.....	43
3.4.1. Método de fabricación.....	45
3.4.1.1. Corte de los perfiles.....	45
3.4.1.2. Curvado de los perfiles.....	47
3.4.1.3. Unión de los perfiles.....	48
3.4.1.4. Preparación superficial y pintado.....	49
Capítulo 4: Análisis del chasis.....	50
4.1. Método de los elementos finitos (MEF).....	51
4.1.1. Fundamentos del método de los elementos finitos.....	51
4.2. Algoritmo de cálculo.....	54
4.3. Ensayos establecidos por la norma.....	55
4.4. Fases del análisis del chasis.....	56
4.4.1. Selección y aplicación del material.....	58
4.4.2. Aplicación de cargas.....	59
4.4.3. Aplicación de restricciones.....	60
4.4.4. Creación de la malla.....	61
4.4.5. Análisis estático.....	62
4.4.6. Obtención de resultados.....	64
Capítulo 5: Resultados.....	66
5.1. Criterio de Von Mises.....	67
5.2. Tipos de análisis.....	67
5.2.1. Análisis de carga vertical.....	67
5.2.1.1. Diseño 1.....	68
5.2.1.2. Diseño 2.....	71
5.2.1.3. Diseño 3.....	74



5.2.1.4. Diseño 4.....	77
5.2.2. Análisis de carga longitudinal.....	80
5.2.2.1. Diseño 4.....	80
5.2.2.1.1. Carga positiva.....	80
5.2.2.1.2. Carga negativa.....	83
5.2.3. Análisis de carga lateral.....	85
5.2.3.1. Diseño 4.....	86
5.3. Solución final.....	89
Capítulo 6: Presupuesto.....	91
Capítulo 7: Conclusiones y trabajos futuros.....	94
7.1. Conclusiones.....	95
7.2. Trabajos futuros.....	96
Capítulo 8: Referencias.....	97
ANEXO I: Planos.....	100



Índice de figuras	Pág.
Figura 1: Carcross trazando una curva.....	14
Figura 2: Carcross actual.....	14
Figura 3: Carcross “Go” del año 1990.....	16
Figura 4: Carcross Tenroj actual.....	16
Figura 5: Casco abierto.....	17
Figura 6: Casco cerrado de carbono.....	17
Figura 7: Sotocasco sabelt.....	18
Figura 8: Ropa ignífuga.....	18
Figura 9: Hans homologado de carbono.....	19
Figura 10: Componentes del Hans.....	19
Figura 11: Bacquet de competición.....	20
Figura 12: Arnés de 6 puntos.....	20
Figura 13: Chasis antiguo de Renault 5.....	21
Figura 14: Carrocería antigua.....	22
Figura 15: Carrocería autoportante del mazda 3.....	22
Figura 16: Chasis multitubular.....	23
Figura 17: Diagrama tensión deformación.....	26
Figura 18: Estructura triangularizada.....	27
Figura 19: Eje de balanceo.....	28
Figura 20: Algoritmo de diseño.....	30
Figura 21: Entorno Solid Edge V19.....	31
Figura 22: Entorno pieza de Solid Edge V19.....	31
Figura 23: Boceto del piloto.....	32
Figura 24: Puntos de referencia del boceto del piloto.....	32
Figura 25: Perfil del arco delantero.....	33
Figura 26: Trayectoria y boceto del modelo.....	33
Figura 27: Tipo de trayectoria.....	33



Figura 28: Trayectoria.....	34
Figura 29: Sección que barrera la trayectoria.....	34
Figura 30: Arco delantero y boceto del piloto.....	35
Figura 31: Trayectoria del tubo central.....	35
Figura 32: Resultado final del arco delantero.....	36
Figura 33: Barras de unión superiores.....	37
Figura 34: Barras longitudinales inferiores.....	37
Figura 35: Arco central.....	38
Figura 36: Semiarcos traseros.....	39
Figura 37: Semiarcos intermedio y delanteros.....	40
Figura 38: Barras longitudinales laterales.....	40
Figura 39: Vista frontal del diseño completo.....	41
Figura 40: Verificar geometría.....	41
Figura 41: Verificar geometría II.....	42
Figura 42: Resultado geometría.....	42
Figura 43: Asignar material al modelo.....	42
Figura 44: Propiedades físicas.....	42
Figura 45: Sierra de banda.....	46
Figura 46: Sierra de disco.....	46
Figura 47: Soplete.....	46
Figura 48: Preparación de bordes.....	47
Figura 49: Curvadora manual hidráulica.....	47
Figura 50: Curvadora de rodillos.....	47
Figura 51: Equipo de soldar.....	48
Figura 52: Algoritmo de cálculo.....	54
Figura 53: Abrir archivos “*.igs” en PEW5.....	57
Figura 54: Acceso al módulo “Mechanica”.....	57
Figura 55: Tipo de análisis.....	58
Figura 56: Biblioteca de materiales.....	58



Figura 57: Aplicar material.....	59
Figura 58: Menú de cargas.....	59
Figura 59: Modelo cargado.....	60
Figura 60: Restricciones del modelo.....	60
Figura 61: Modelo previo al mallado.....	61
Figura 62: Creación de la malla.....	62
Figura 63: Análisis/Estudios de “Mechanica”.....	63
Figura 64: Entorno de análisis.....	63
Figura 65: Nuevo análisis estático.....	63
Figura 66: “Setting” del análisis.....	64
Figura 67: Menú de resultados.....	65
Figura 68: Diseño 1 en SEV19.....	68
Figura 69: Diseño 1 antes de analizar.....	69
Figura 70: Desplazamientos en el eje Z del Diseño 1.....	69
Figura 71: Tensión de Von Mises del Diseño 1.....	70
Figura 72: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 1.....	70
Figura 73: Diseño 2 en SEV19.....	71
Figura 74: Diseño 2 antes de analizar.....	72
Figura 75: Desplazamientos en el eje Z del Diseño 2.....	72
Figura 76: Tensión de Von Mises del Diseño 2.....	73
Figura 77: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 2.....	73
Figura 78: Diseño 3 en SEV19.....	74
Figura 79: Diseño 3 antes de analizar.....	75
Figura 80: Desplazamientos en el eje Z del Diseño 3.....	75
Figura 81: Tensión de Von Mises del Diseño 3.....	76
Figura 82: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 3.....	76
Figura 83: Diseño 4 en SEV19.....	77
Figura 84: Diseño 4 antes de analizar.....	78
Figura 85: Desplazamientos en el eje Z del Diseño 4.....	78



Figura 86: Tensión de Von Mises del Diseño 4.....	79
Figura 87: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 4.....	79
Figura 88: Diseño 4 antes de analizar en longitudinal positivo.....	81
Figura 89: Desplazamientos en el eje X del Diseño 4 positivo.....	81
Figura 90: Tensión de Von Mises del Diseño 4 positivo.....	82
Figura 91: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 4 positivo..	82
Figura 92: Diseño 4 antes de analizar en longitudinal negativo.....	83
Figura 93: Desplazamientos en el eje X del Diseño 4 negativo.....	84
Figura 94: Tensión de Von Mises del Diseño 4 negativo.....	84
Figura 95: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 4 negativo..	85
Figura 96: Diseño 4 antes de analizar lateral.....	86
Figura 97: Desplazamientos en el eje X del Diseño 4 lateral.....	87
Figura 98: Tensión de Von Mises del Diseño 4 lateral.....	87
Figura 99: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 4 lateral....	88
Figura 100: Vista de perfil delantero.....	89
Figura 101: Vista de perfil trasero.....	89
Figura 102: Vista de alzado.....	89
Figura 103: Vista de planta.....	89
Figura 104: Vista isométrica.....	89
Figura 105: Tabla de propiedades del Diseño 4.....	90



Índice de tablas

Pág.

Tabla 1: Evolución de los chasis tipo carcass.....	15
Tabla 2: Componentes obligatorios por la normativa RFEDA.....	16
Tabla 3: Propiedades físicas y mecánicas del acero S 355 J2H.....	44
Tabla 4: Presupuesto detallado.....	92



CAPÍTULO 1:

Objetivos y Motivación del proyecto



1. Objetivos y motivación del proyecto.

El presente documento trata sobre el estudio de un chasis tipo carcass destinado a la competición, siguiendo la normativa de la Real Federación Española De Automovilismo (RFEDA) [6]. Se ha modelado una estructura con herramientas de Diseño Asistido por Computador (CAD) y posteriormente analizado mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF).

Los objetivos que se persiguen con este estudio son:

- a) Realizar el **modelado de un chasis tipo carcass** destinado a la competición. Para ello, se usará el programa *Solid Edge V19*. Se tratará de un diseño nuevo e innovador, cuyos principios se basan en anteriores modelos, pero incorporando nuevas mejoras, como una excelente relación resistencia/ligereza combinada con un diseño elegante y atractivo, factor importante a la hora de decidirse por un modelo u otro.
- b) Una vez realizado el modelado, se comprobará que el chasis diseñado se puede fabricar en caso de cumplir la normativa [6]. Por último, el chasis será analizado con el programa *Pro Engineer W5* gracias a su módulo *Mechanica*, el cuál proporciona una serie de herramientas para llevar a cabo esta tarea. De paso, se darán una serie de explicaciones básicas sobre cómo funcionan ambos programas.



CAPÍTULO 2:

Introducción

2. Introducción.

2.1. Historia.

El **carcross** es una disciplina del automovilismo de las más espectaculares, baratas y sencillas de practicar, a la vez de las más competitivas por su relación precio-prestaciones-satisfacción [14].

Esta variante del automovilismo tiene sus orígenes en los Estados Unidos, siendo importada a Europa por Francia en la década de los 80, aunque hasta los años 90 no fue instalada en España. Fue en Francia donde experimentó un gran desarrollo, donde los Car-Cross con motores automáticos fueron desapareciendo para dar paso a los motores 2CV.



Figura 1: Carcross trazando una curva

En la actualidad, los vehículos incorporan motores de 600cc de motocicletas, los cuales superan los 100 cv de potencia y poseen diversos avances tecnológicos como la inyección electrónica. Todo ello unido a sus 300 kg de peso hace de esta una de las competiciones del automovilismo más espectaculares.



Figura 2: Carcross actual



2.2. Seguridad en la competición carcass.

2.2.1. Chasis.

A la hora de hablar de seguridad, siempre se piensa en elementos como casco, arnés, mono, etc. Sin embargo, el principal elemento que protege al piloto es el chasis. A lo largo de los años, los chasis de los vehículos carcass han experimentado notables cambios. En la tabla 1 se compararán las semejanzas y diferencias:

	Chasis Antiguo	Chasis Moderno
Material	Los primeros chasis que se fabricaron eran de hierro.	Los chasis que se fabrican hoy son de acero.
Geometría	Tenían un espacio reducido para el piloto, poniendo en peligro su integridad. Los perfiles eran de menor diámetro que en la actualidad, lo que redundaba sobre la resistencia del mismo.	El piloto conduce cómodamente ya que el espacio asignado lo permite. Los perfiles actuales tienen un diámetro mayor, con pequeños espesores, permitiendo fabricar chasis más ligeros.
Carrocería	Las carrocerías antiguas estaban hechas de chapa de acero, lo que suponía un peligro si alguna se desprendía en plena carrera. Además son materiales pesados.	Las carrocerías actuales están hechas de materiales compuestos, donde una resina endurece la fibra de vidrio, fibra que se moldea fácilmente, adaptándose a todo tipo de superficies y formas. Además tienen poco peso.
Método de fabricación	Antiguamente, los perfiles adquirían curvas porque se cortaban a inglete y se soldaban, dando lugar a la aparición de aristas vivas que suponían un peligro para los pilotos.	Los perfiles actuales se curvan con máquinas adaptadas, lo que permite ahorrar un buen número de soldaduras.

Tabla 1: Evolución de los chasis tipo carcass

A continuación, se muestran las figuras 3 y 4. En ellas se puede observar los cambios que han sufrido los vehículos. La figura de la izquierda muestra el espacio reducido del que disponía el piloto mientras que en la de la derecha se aprecia un espacio más amplio, lo que facilita la conducción.



Figura 3: Carcross “Go” del año 1990



Figura 4: Carcross Tenroj actual

Aunque ya se ha dicho que el chasis es el elemento más importante en cuanto a protección del piloto se refiere, este debe ir acompañado del equipamiento adecuado. El uso de casco, traje, guantes, etc. Resulta de vital importancia para asegurar que el piloto no sufrirá heridas graves en caso de accidente. La normativa exige la utilización de los siguientes componentes [12]:

	Casco	Sotocasco	Mono	Guantes	Calzado	Ropa interior	Hans	Collarín
Autocross carcross	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio	No Obligatorio

Tabla 2: Componentes obligatorios por la normativa RFEDA

Por tanto, a continuación se describirán cada uno de los componentes del equipamiento obligatorio que velan por la seguridad del piloto.

2.2.2. Casco.

Regido por varios estándares de calidad [16] y normativas[9], es la única protección de la que disponen los pilotos para la cabeza. Su proceso de fabricación exige controles exhaustivos ya que deben garantizar que sea cual sea el tipo de impacto, el casco no debe deformarse apenas ni sufrir rotura. Pueden ser de tipo abierto o cerrado y deben incorporar materiales ignífugos como el NOMEX®, polímero aromático sintético de poliamida que proporciona altos niveles de integridad eléctrica, química y mecánica.



Figura 5: Casco abierto

Deben llevar incorporados un sistema de amarre para instalar el Hans, componente imprescindible del que se hablará más adelante. Algunos cascos llevan un intercomunicador instalado para recibir instrucciones a lo largo de la carrera.

Los cascos modernos están fabricados con fibra de carbono, haciéndolos muy ligeros a la par que resistentes. La fibra de carbono es un material compuesto donde un endurecedor (resina o polímero) da forma y resistencia a las fibras de carbono. Poseen además elevada resistencia térmica y son inertes a la mayoría de agentes químicos. Su principal desventaja es el elevado precio que presentan.



Figura 6: Casco cerrado de carbono

2.2.3. Sotocasco.

Regido por la normativa [10], se trata de un componente muy importante en la competición. Bajo el casco, su misión es la de proteger el rostro del piloto en caso de incendio. Debe estar fabricado con NOMEX®, protegiendo la totalidad de la cara y el cuello, donde permanece correctamente sujeto por el mono.



Figura 7: Sotocasco sabelt

2.2.4 Ropa ignífuga.

Regida por la normativa [10], es el principal elemento de protección frente al fuego del que disponen los pilotos, además de minimizar los efectos de rozaduras e impactos de objetos exteriores. En este bloque incluimos el mono, guantes, calzado y ropa interior, componentes que tienen funciones muy parecidas. Deben estar fabricados con NOMEX® y KEVLAR®.



Figura 8: Ropa ignífuga

2.2.5. Hans.

Regido por la normativa [11], es un dispositivo de muy reciente uso. Comenzó a emplearse en la fórmula CART americana en el año 2000, haciéndose obligatorio a partir del 2001. Más tarde se unió a la F1 y el WRC. En España se hizo obligatorio en competiciones de turismo en 2008.



Figura 9: Hans homologado de carbono

Su misión principal es la de evitar lesiones cervicales en caso de impacto lateral o frontal. Diversos pilotos han sufrido accidentes muy graves a largo de la historia, como Fernando Alonso en el gran premio de Interlagos en Brasil (2003), en el que el Hans le salvó la vida.

Este componente va anclado al casco con unos tirantes que poseen clips de ajuste rápido y cae por los hombros desde el cuello hasta la parte delantera del piloto, donde tiene su caída y por la que pasa el arnés del vehículo. Se aprecia en la figura 10:

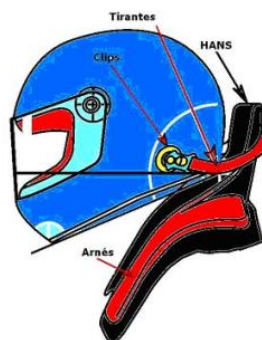


Figura 10: Componentes del Hans

2.2.6. Otros componentes.

Existen otros componentes de seguridad, externos al piloto y que también juegan un papel muy importante en la seguridad del mismo. Se habla del asiento y del arnés.

- **Asiento Bacquet:** regido por la normativa [7], su función principal es la de alojar el cuerpo del piloto, proporcionándole comodidad y seguridad, abrazándolo para conseguir que esté lo más amarrado posible durante la carrera. Posee acero en su interior, así como materiales compuestos tipo KEVLAR®. Carecen de regulación e inclinación, por lo que es fundamental su posición exacta en el vehículo. Tienen una caducidad de 5 años desde su fabricación.



Figura 11: Bacquet de competición

- **Arnés:** regido por la normativa [8], se trata de cinturones de seguridad acoplados en vehículos de competición que impiden la salida del vehículo por parte del piloto en caso de accidente o colisión. Suelen tener 6 puntos de amarre, con apertura rápida, atornillados a unos soportes soldados al chasis. Tienen una caducidad de 5 años desde la fecha de fabricación.



Figura 12: Arnés de 6 puntos

2.3. La carrocería y el chasis.

En la mayoría de los casos, cuando se observa un vehículo, se desconoce por completo cada una de sus partes. Se piensa que lo más importante de todo es el motor, por ello se le suele realizar un mantenimiento periódico. No obstante, existen otras muchas partes de un vehículo que durante toda la vida útil del mismo pasan desapercibidas por completo y, sin embargo, son de vital importancia. Se habla, como no, de la carrocería y el chasis.

Cualquier vehículo necesita una estructura en la que acoplar todos los componentes mecánicos, eléctricos, interiores de confort, etc., y que a su vez le confiera resistencia suficiente para soportar las solicitaciones a las que pueda estar sometido, incluido un inesperado accidente en el que, deformándose de manera programada, deberá preservar el habitáculo interior para proteger la integridad de sus ocupantes.

Antiguamente, estas funciones se repartían entre dos componentes [17]:

- El chasis, que es el armazón metálico sobre el que se montan y relacionan los elementos principales del automóvil: la carrocería, el motor, la transmisión y la suspensión con las ruedas.



Figura 13: Chasis antiguo de Renault 5

- La propia carrocería, habitáculo metálico sobre el que, por su parte exterior se montan algunos componentes mecánicos y eléctricos con pocas solicitaciones mecánicas, y en su interior se instalan los elementos de confort y control del vehículo.



Figura 14: Carrocería antigua

En la actualidad, las técnicas de diseño, cálculo y fabricación de carrocerías han evolucionado de tal manera que son capaces de asumir, además de las funciones mencionadas, las de formar una verdadera estructura resistente, sobre la que se montan todos los elementos mecánicos. A este tipo de carrocerías se las denomina *autoportantes*.



Figura 15: Carrocería autoportante del mazda 3

Sin embargo, el chasis está presente en vehículos de carga y también como refuerzo en los coches de competición tipo carcass, fórmula SAE, etc. Se trata de un marco metálico conocido como bastidor sobre el que se montan todos los componentes del vehículo. La carrocería se instala sobre este bastidor o chasis.

En cuanto al comportamiento mecánico hay que decir que el chasis es más rígido que la carrocería. Interesa, en el momento de choque, que la carrocería se deforme todo lo que se pueda para no transmitir la energía de la colisión a los pasajeros y por otra parte interesa que el chasis se deforme poco para no alterar las características de la conducción.



En los carcass los chasis son tubulares debido a su relativa sencillez de diseño y fabricación, así como la determinación de sus esfuerzos. En este proyecto se va a analizar este último tipo.



Figura 16: Chasis multitubular



CAPÍTULO 3:

Diseño del chasis



3. Diseño del chasis.

Un chasis es una estructura que se encarga de unir rígidamente la suspensión delantera y trasera, al mismo tiempo que ofrece puntos de amarre para los diferentes componentes del vehículo, así como de proteger al conductor de un posible accidente. Es en estos casos cuando el chasis debe responder adecuadamente ya que debe ser lo suficientemente resistente para deformarse poco y proteger la integridad del piloto.

A la hora de diseñar un chasis tipo carcass se debe establecer un compromiso entre resistencia-peso-espacio, todo ello sin alterar el precio final. En realidad, en estas estructuras hay que tener en cuenta múltiples y diversos factores como por ejemplo la resistencia estática, dinámica, fatiga, estabilidad de los elementos estructurales, montaje, fabricación, etc. En este proyecto se tratarán únicamente cargas estáticas.

3.1. Criterios de diseño.

A continuación, se van a establecer una serie de criterios que serán respetados a la hora de modelar la estructura.

3.1.1. Rigidez. Fundamento teórico.

La resistencia de materiales se encarga de establecer los criterios para determinar el material, la forma y las dimensiones de los elementos de construcción para resistir las sollicitaciones a las que están expuestos.

Se define rigidez como la capacidad que tiene un elemento estructural para oponerse a las deformaciones [18]. En términos matemáticos, se define la rigidez como:

$$K = \frac{P}{\delta}$$

Siendo: P, la carga aplicada

δ , la deformación

Se define resistencia mecánica como la capacidad que tiene un elemento estructural de soportar esfuerzos sin llegar a la rotura. En el diagrama tensión-deformación de la figura 17 se observa:

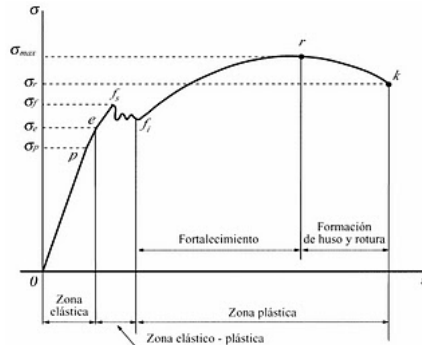


Figura 17: Diagrama tensión deformación

- De 0 a p, existe proporcionalidad σ/ϵ (límite de proporcionalidad σ_p).
- De p a e, el comportamiento del material es no lineal y elástico (límite de elasticidad σ_e), no existiendo deformaciones plásticas en este intervalo.
- De e a f, la gráfica toma otra curvatura pero, además, las deformaciones empiezan a ser permanentes (límite de fluencia σ_f).
- De f a r, las deformaciones son elevadas sin aumentar mucho la carga hasta r, punto en el que la sección del material comienza a disminuir dando lugar a la estricción (límite máximo σ_{\max}).
- De r a k, a partir de aquí la tensión disminuye, aumentando la deformación, hasta que en el punto k se produce la rotura (límite de rotura σ_r).

En la zona lineal de la gráfica el material se comporta de forma elástica según la ley de Hooke, donde la tensión σ es proporcional a la deformación ϵ , es decir:

$$\sigma = E \epsilon, \text{ donde:}$$

E es el módulo de Young o módulo de elasticidad.

A partir del punto p, la función deja de ser lineal, es decir, deja de cumplirse la ley de Hooke y es en el punto f cuando comienza la zona plástica, hasta llegar a la rotura.

Uno de los criterios a tener en cuenta a la hora de modelizar la estructura es el de la triangularización de las barras. Se trata de realizar el diseño del chasis teniendo en cuenta la formación constante de pequeños triángulos que, unidos todos ellos, formen el conjunto. Con ello se consigue que las barras trabajen principalmente a esfuerzo axial (preferiblemente de tracción, para evitar pandeo) y se minimicen los esfuerzos de flexión y torsión.



Figura 18: Estructura triangularizada

En resumen, en cuanto a la rigidez se refiere, a la hora de diseñar el chasis, se van a tener en cuenta los siguientes criterios:

- A efectos de diseño no se va a tener en cuenta la rigidez que proporcionan ciertas partes del chasis nada despreciables como, por ejemplo, el motor.
- Los elementos que producen mucha carga (motor, suspensión,...) deberían ir fijados al chasis en puntos triangularizados.
- Deberá existir un arco de seguridad delantero y otro central unidos por la parte superior, con un diámetro mínimo de 40 mm y un espesor mínimo de 2mm [6].
- Deben instalarse dos tirantes longitudinales fijados al arco central y que se desplacen hacia atrás lo máximo posible [6].
- Será obligatorio el uso de protecciones laterales cuyas dimensiones mínimas serán de 30 mm de diámetro y 2 mm de espesor, soldadas al chasis a ambos lados del vehículo, a la altura del eje de las ruedas, y ocupando, al menos, el 60 % de la batalla. Estas estructuras se extenderán como máximo hasta la línea imaginaria que une las dos ruedas de un mismo lado [6].

- Los anclajes del cinturón de seguridad no debería deformarse perceptiblemente durante el choque.
- El chasis debe ser especialmente rígido en su parte delantera, donde se sitúan los pies del piloto.

3.1.2. El peso y su distribución.

A la hora de tomar una curva es fácil ver que el vehículo balancea; lo complicado es averiguar sobre qué punto lo hace.

Cuando el chasis balancea, lo hace alrededor de un eje (eje de balanceo) definido por la unión de dos puntos, los centros de balanceo, uno en cada eje del vehículo [19]. La figura 19 muestra un ejemplo:

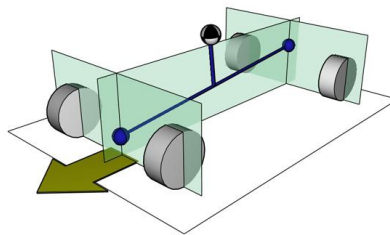


Figura 19: Eje de balanceo

Los centros de balanceo vienen determinados por la suspensión y estos varían notablemente su posición cuando el coche se está moviendo o trazando una curva. Aunque en este proyecto no se habla de suspensión, es conveniente citar que el eje de balanceo y el centro de gravedad del vehículo son dos conceptos que hay que tener muy en cuenta a la hora de diseñar un chasis.

Por tanto, de cara al diseño, se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Para disminuir el balanceo, se intentará que el centro de gravedad del vehículo quede lo más bajo posible, ya que el brazo de palanca donde actuará la fuerza centrífuga al tomar una curva será menor. Para conseguir esto, se aumentará en lo posible el ancho de vía (siempre que no se sobrepasen los 1600 mm que marca la normativa [6]) y se situarán todos los anclajes de los elementos lo más bajo posible.



- Cuanto menor sea el peso del chasis, respetando la resistencia, mejor se aprovechará la potencia del motor, teniendo en cuenta que, según normativa, en ningún momento el peso mínimo del vehículo podrá ser inferior a 310 kg sin piloto, sin combustible, sin agua en el pulverizador y en orden de marcha [6].

3.1.3. El espacio.

Lo más importante que se debe tener en cuenta respecto al espacio es la evacuación del piloto en caso de accidente, así como la previa evaluación de su estado dentro del vehículo, siempre que se garantice una relativa comodidad en la conducción. Por ello, en cuanto al diseño, se tendrá en cuenta lo siguiente:

- Se debe garantizar la facilidad de acceso a los distintos elementos para tareas de mantenimiento.
- La estructura no debe inferir con el conductor en los movimientos que este realice.
- En los pedales se debe garantizar el espacio suficiente para poder manejarlos con relativa facilidad.
- La línea trazada entre la parte superior de los arcos central y delantero debe superar, como mínimo, en 5 cm el casco del piloto [6]. Para ello, se va a establecer como media de alturas 185 cm con un percentil del 95%, es decir, que el 95% de los pilotos será menor que esta altura y sólo el 5% será mayor.

3.1.4. El coste.

Para intentar minimizar el coste, se va a tener en cuenta los siguientes aspectos a la hora del diseño:

- La normativa [6] expone que las barras de los arcos delantero y central sean de 40 mm de diámetro y 2 mm de espesor como mínimo y el resto de barras de 30 mm de diámetro y 2 mm de espesor. Para no variar el tipo de barra, se escogerá un único tipo que cubra todas las necesidades.



- Se intentará disminuir en lo posible el número de barras curvadas, así como el número de uniones.
- Las barras deberán ser tan largas como se pueda para disminuir el número de soldaduras a tope.

3.2. Algoritmo de diseño.

Para establecer una jerarquía en las operaciones del modelado, se seguirán los pasos que refleja el algoritmo para poder verificar que, una vez terminado el modelo, puede someterse a la fase de cálculo, no sin antes comprobar la posibilidad de poder ser fabricado. La figura 20 muestra el algoritmo de diseño:

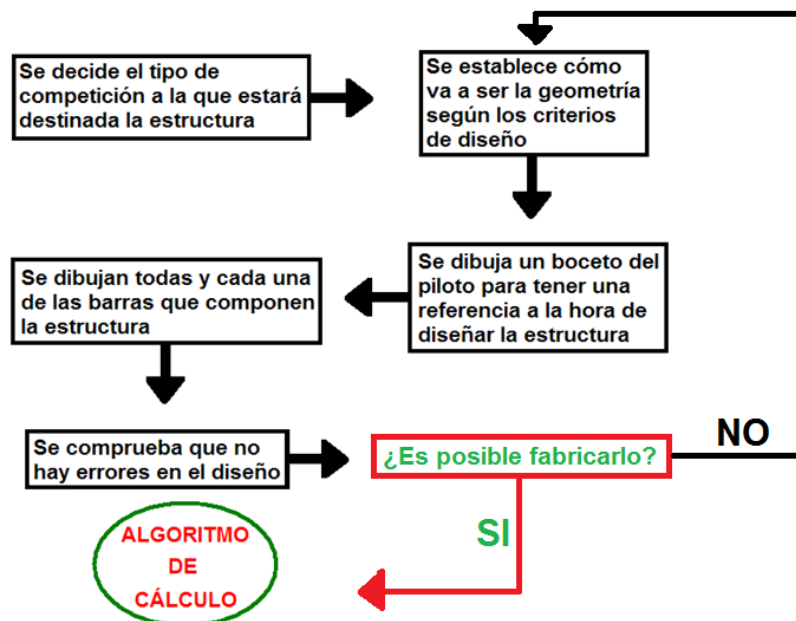


Figura 20: Algoritmo de diseño

3.3. Modelado del chasis.

En base a todo lo descrito hasta aquí, se va a explicar paso a paso todas y cada una de las fases del modelado del chasis, realizado con el software Solid Edge V19 [4].

Con el programa abierto, se pincha en pieza sólida para comenzar a dibujar nuestra pieza, el chasis.

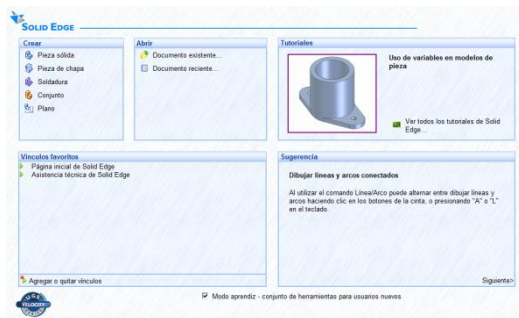


Figura 21: Entorno SEV19

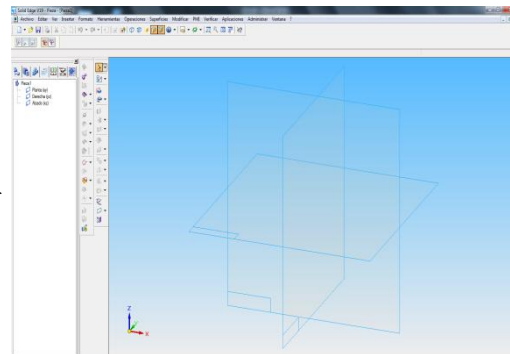




Figura 22: Entorno pieza de SEV19

A continuación, se explicará siguiendo el algoritmo de diseño, cada una de las fases del modelado del chasis.

3.3.1 Boceto del piloto.

Lo más importante a la hora de diseñar el chasis es garantizar que el piloto no sufrirá daño alguno en caso de accidente, pudiendo ser evacuado con facilidad. Para ello, lo primero que se diseña es un boceto del piloto (teniendo en cuenta la altura establecida de 185 cm) y todo lo demás será dibujado teniendo en cuenta su posición en el vehículo.

Boceto nuevo  → Se selecciona el plano  Plano coincidente → Se dibuja el boceto del piloto.

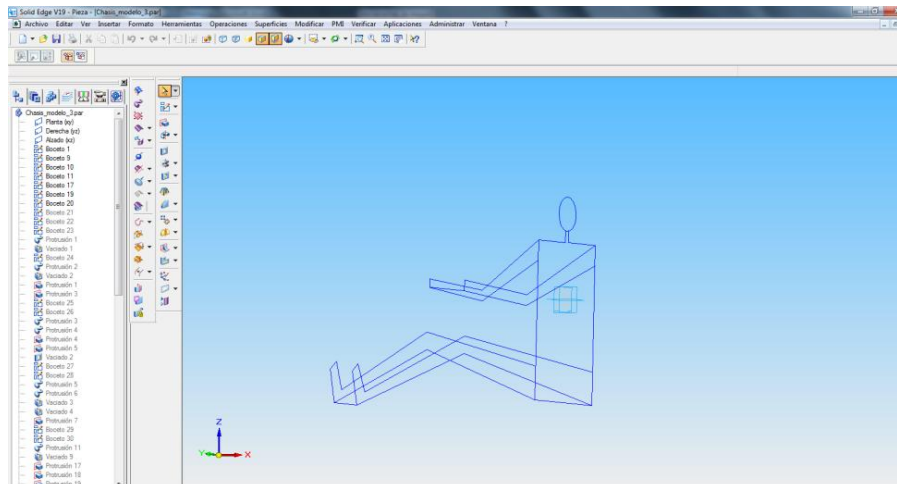

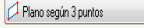


Figura 23: Boceto del piloto

Este dibujo está realizado a base de varios bocetos con distintos planos ya que resulta imposible dibujar todo el piloto en un solo plano.

3.3.2 Arco delantero.

Una vez dibujado el piloto, se va a diseñar el arco delantero, teniendo en cuenta los criterios de diseño iniciales. Para ello, se va a crear un nuevo boceto en un plano según tres puntos. Estos puntos se van a sacar del boceto del piloto.

Boceto nuevo  → Se elige el plano  → Se seleccionan tres puntos del piloto por su parte delantera de tal forma que el arco tenga la inclinación adecuada.

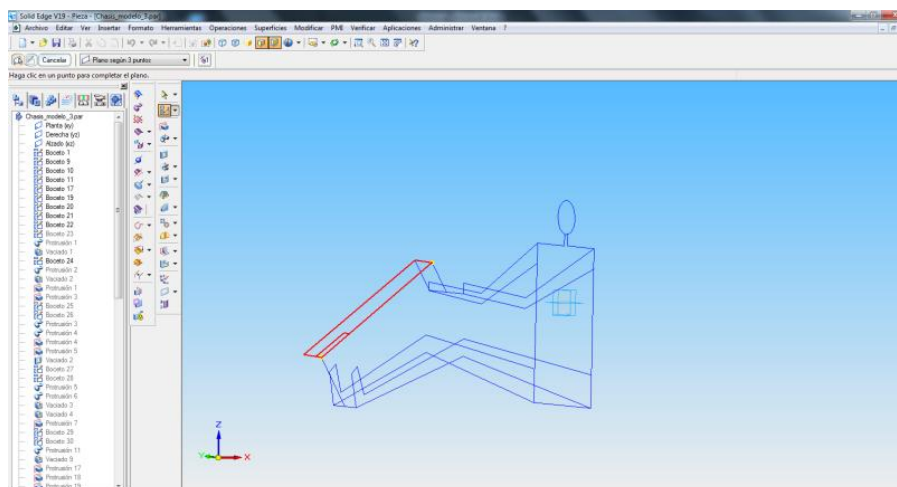


Figura 24: Puntos de referencia del boceto del piloto

La figura 24 muestra en color rojo el plano citado anteriormente. En cada vértice del mismo vemos los puntos que sirven de referencia para crear el boceto del arco delantero.

Una vez seleccionado el plano, se dibuja la trayectoria del arco delantero. Para ello, se usará la barra de herramientas que contiene botones para crear líneas, radios de acuerdo, etc.

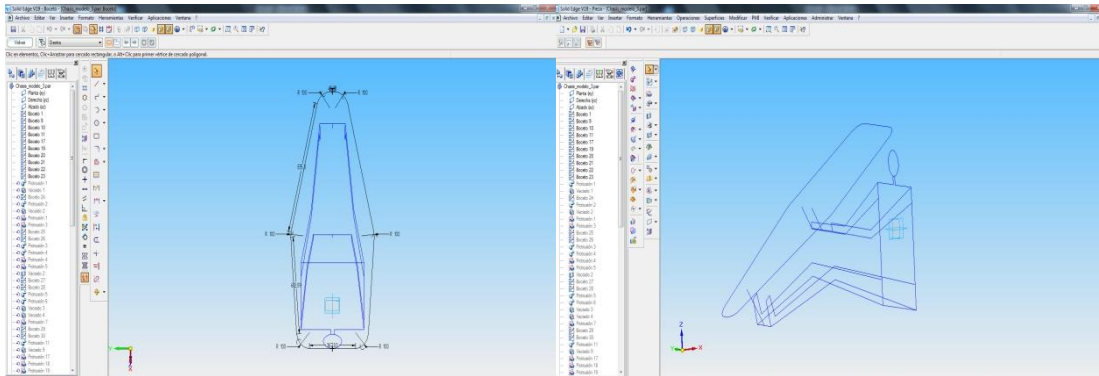



Figura 25: Perfil del arco delantero Figura 26: Trayectoria y boceto del modelo

A continuación se extruye la trayectoria creada para dar forma al arco delantero.

Protrusión por barrido  → Se selecciona el tipo de trayectoria en el menú emergente y se aceptan el resto de opciones.

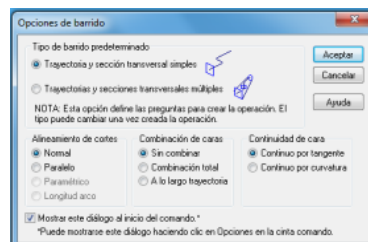
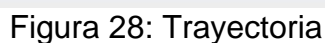


Figura 27: Tipo de trayectoria

Una vez realizados los pasos anteriores, se selecciona la trayectoria a extruir. Para dibujar la sección que barrerá dicha trayectoria seleccionamos un plano perpendicular a la curva y se dibuja la sección.



El resultado final del arco delantero se representa en la siguiente figura. Se deben realizar operaciones posteriores en dicho arco, como el dibujo del tubo central o el tubo inferior.

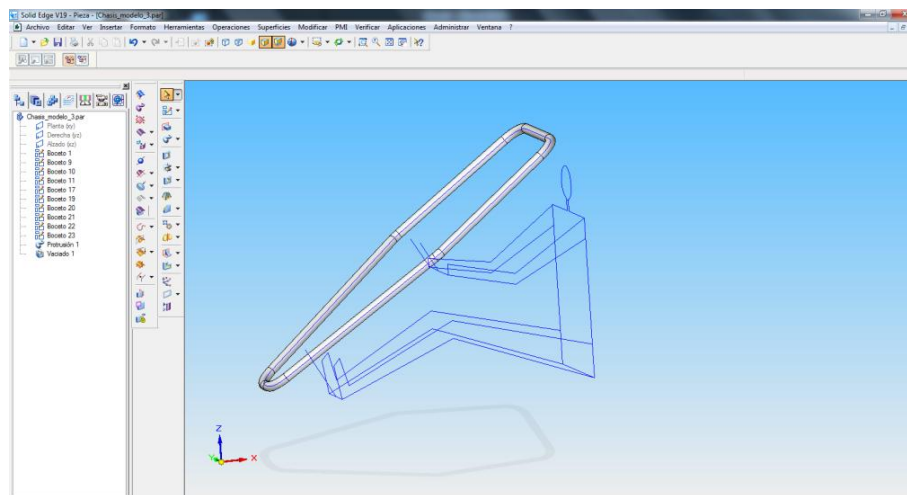


Figura 30: Arco delantero y boceto del piloto

Como se puede observar en la figura 30, tanto los pies como la cabeza guardan la distancia necesaria que establece la normativa [6] para garantizar que el piloto no sufra daños en caso de accidente.

Para dibujar el tubo central del arco delantero, se crea un nuevo boceto en la línea central imaginaria de las curvas del arco, representado en la figura 31 con línea amarilla.

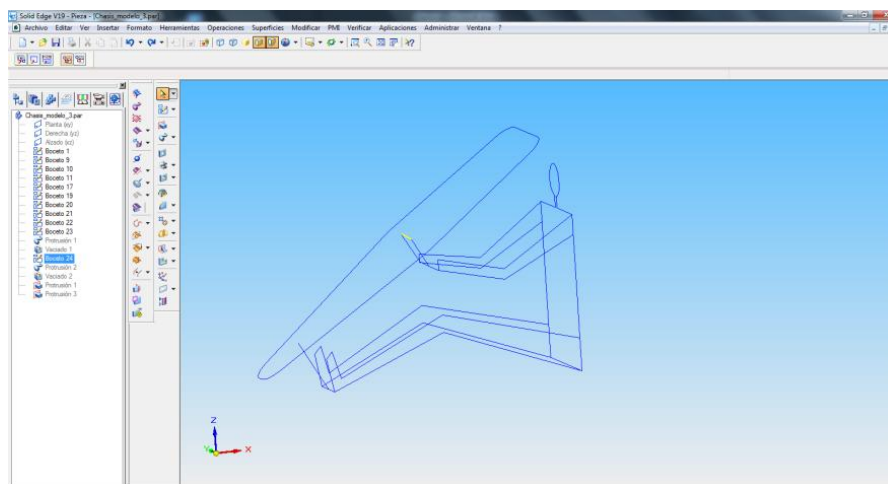

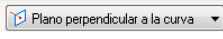





Figura 31: Trayectoria del tubo central

Protrusión  → Se selecciona el tipo de plano  Plano perpendicular a la curva → Se dibuja la sección completa, es decir, tanto la circunferencia de 40 mm como la de 35 mm ya que en esta operación sí que se puede extruir y vaciar simultáneamente → Se pulsa sobre  y para definir la longitud, se pulsa sobre “extensión simétrica”  para extruir a ambos lados del arco y sobre “extender hasta siguiente”  para que el material quede adherido a los tubos del arco principal pero no penetren dentro del mismo, ya que puede dar problemas a la hora del análisis.

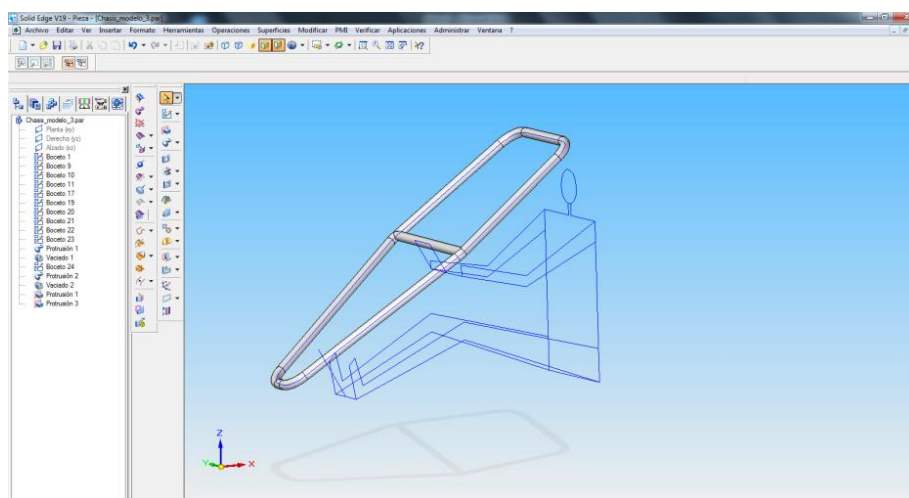


Figura 32: Resultado final del arco delantero

La figura 32 representa el resultado final del arco delantero. A partir de ahora, se mostrarán las fases restantes del diseño, comentando las figuras pero sin entrar en tanto detalle como hasta ahora.

3.3.3 Barras de unión del arco delantero con el arco central.

De forma similar a como se ha dibujado lo anterior, ahora para diseñar estas dos barras de unión, se crean dos bocetos paralelos al plano horizontal con las distancias que dicta la normativa y se realiza una protrusión por barrido en ambos. En este punto se debe destacar que la trayectoria no debe llegar hasta el arco delantero ya que se inserta parte del tubo nuevo en el arco ya creado y dará problemas como antes se mencionaba. La solución a este problema se ha tomado creando, una vez realizadas ambas trayectorias, una protrusión en plano coincidente y extendiendo hasta siguiente para evitar problemas de análisis. El resultado se muestra en la figura 33:

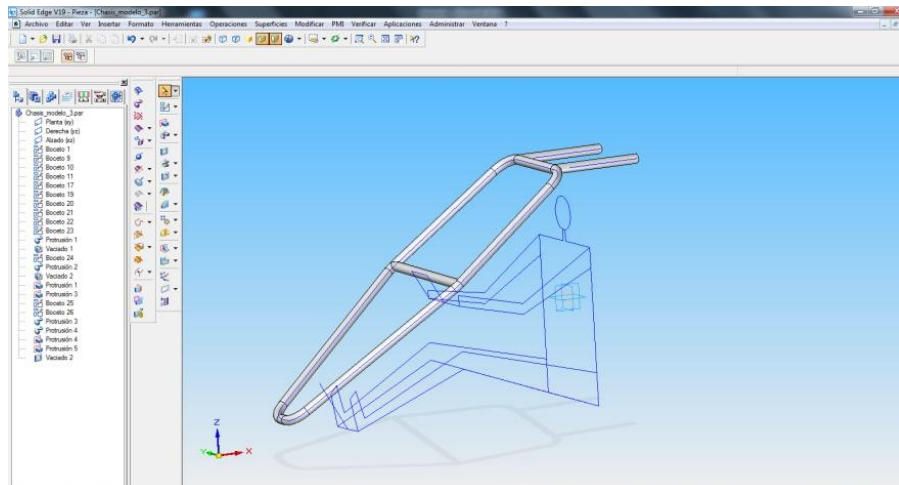


Figura 33: Barras de unión superiores

3.3.4 Barras longitudinales.

Para unir el arco delantero con la parte trasera, donde estará alojado el motor, es necesario crear dos barras longitudinales que unan ambas partes. Estas llevarán encima el asiento del piloto, el motor y parte de los componentes del mismo. Para diseñar estas barras, se procederá de igual forma que en el caso de la unión entre arcos anteriormente descrita, con la salvedad de que la longitud total de estas barras, ya que comprenden la totalidad del vehículo, no debe superar los 2600 mm [6]. El resultado es el de la figura 34:

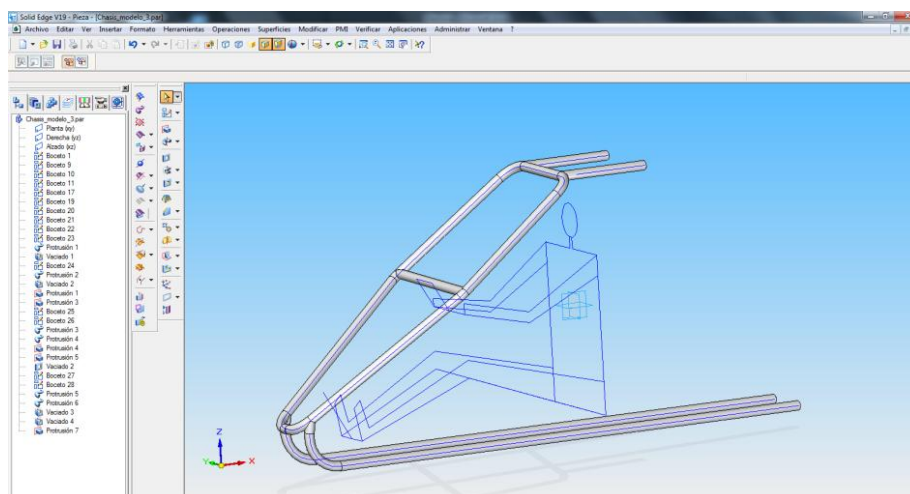


Figura 34: Barras longitudinales inferiores

3.3.5 Arco central.

Diseñada la parte inferior y superior, es momento de crear el arco central, una pieza fundamental en el conjunto debido a que el cuerpo del piloto se encuentra cerca del mismo, lo que le protegerá en caso de accidente. Por ello, se debe diseñar con menos caída que el delantero para que vaya solidario al piloto. Se ve en la figura 35:

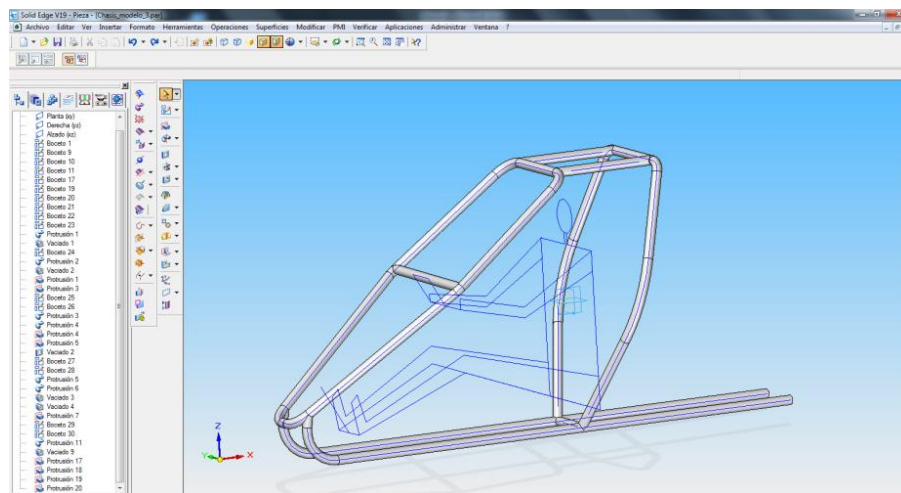


Figura 35: Arco central

3.3.6 Semiarcos traseros.

Se encargarán de unir el arco central con las barras longitudinales del suelo del vehículo, además de alojar en su interior toda la parte mecánica del vehículo: motor, puente de transmisión, electroventilador, depósito de combustible,... La normativa [6] expone que todas las piezas unidas a estos semiarcos no pueden sobresalir de los mismos, debiendo quedar perfectamente fijadas en su interior. La figura 36 muestra el resultado:

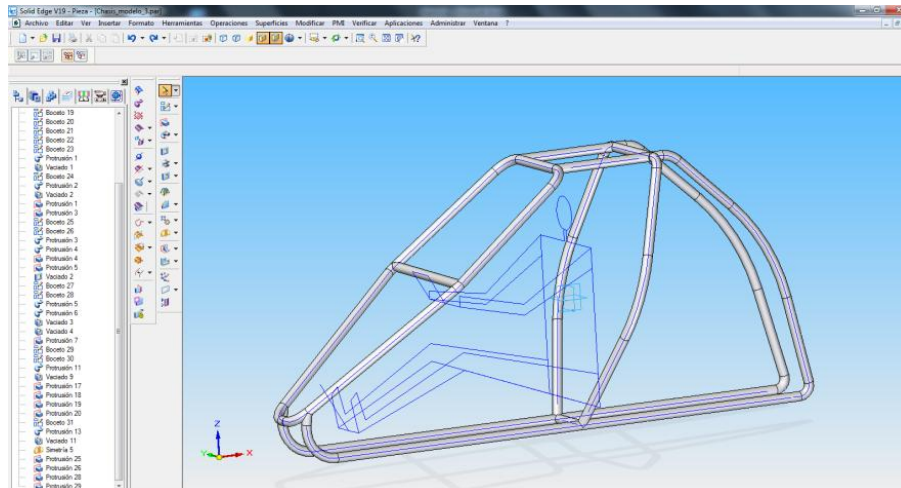



Figura 36: Semiarcos traseros

Destacar en esta fase que, una vez creada la trayectoria de uno de los semiarcos, resultó difícil realizar la segunda trayectoria por lo que se decidió usar el comando “simetría de operación” , lo que permitió crear el segundo semiarco sin ningún problema. Usar la simetría es muy sencillo, se pincha sobre este botón, se seleccionan las operaciones que se quieren copiar y por último se indica cual será el eje de simetría, en este caso, una línea central.

3.3.7 Semiarcos intermedio y delantero.

Para proteger las piernas y pies del piloto de posibles golpes, es necesario crear a la altura de los mismos unos semiarcos que a la vez, proporcionan rigidez al conjunto. La manera de crearlos es similar a la que se viene utilizando para diseñar los semiarcos anteriores, es decir, se dibuja una trayectoria más corta que el semiarco, se extruye y la distancia que falta hasta topar con los restantes tubos se crea con una protrusión según plano coincidente y extender hasta siguiente. El resultado se muestra en la figura 37:

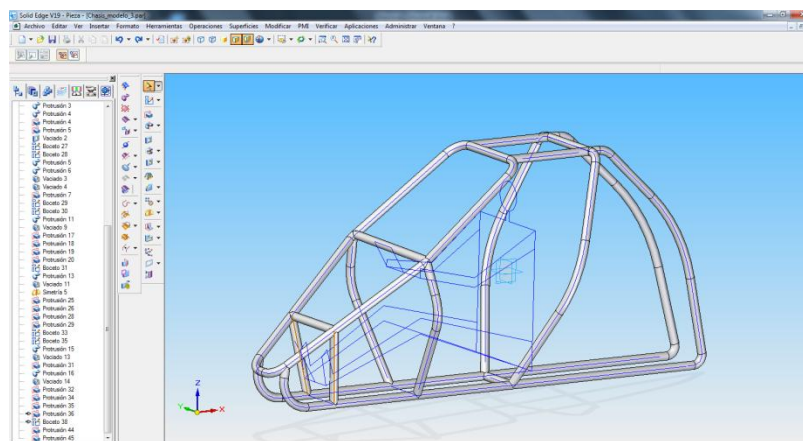


Figura 37: Semiarcos intermedio y delanteros

3.3.8 Barras longitudinales laterales.

Por último, se van a unir los semiarcos creados con unas barras longitudinales, de la parte delantera a la trasera, para proteger al piloto de posibles golpes laterales, sobre todo en la parte central, donde está el cuerpo del mismo. Además estas barras proporcionan rigidez al conjunto. La figura 38 muestran el resultado final:

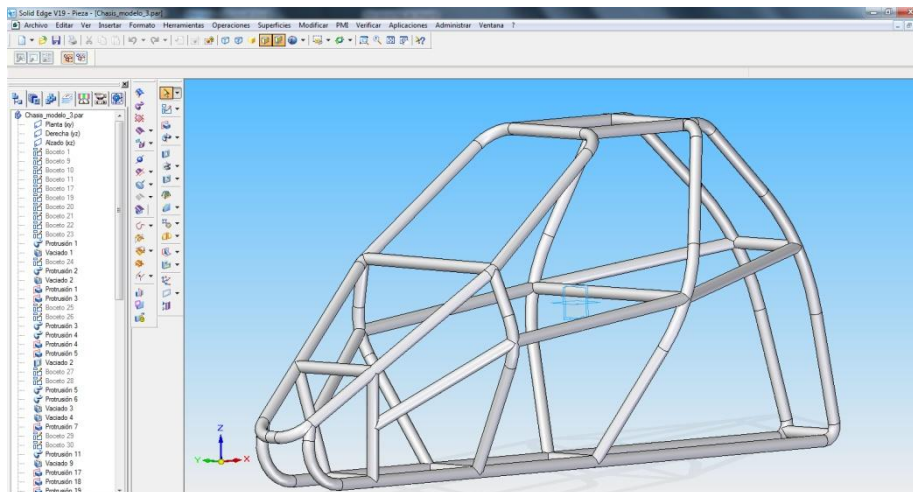


Figura 38: Barras longitudinales laterales

La figura 38 muestra la barra transversal creada a la espalda del piloto. Su función es la de disminuir las deformaciones laterales que se producen en caso de accidente, impidiendo alcanzar el cuerpo del piloto.

A continuación se muestra el resultado del diseño completo:

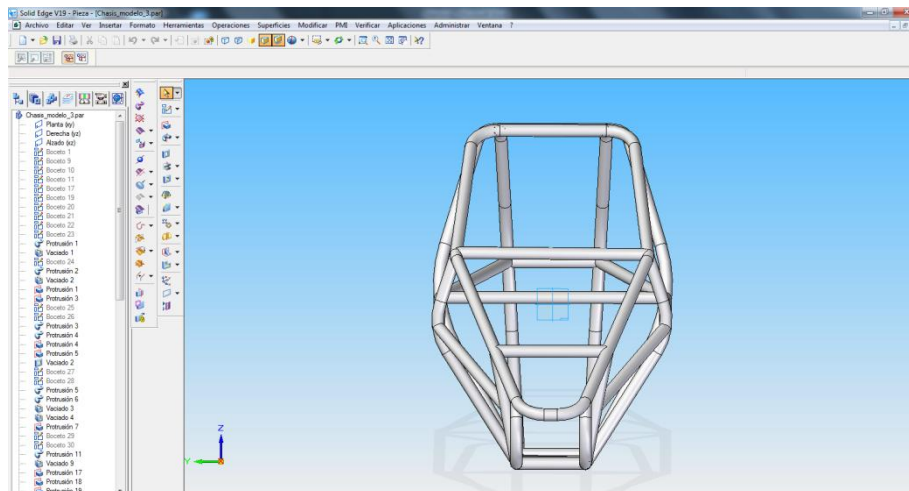


Figura 39: Vista frontal del diseño completo

Una vez completado el diseño y para seguir paso a paso el algoritmo, se va a comprobar que no contiene errores. Para ello se debe verificar la geometría de la siguiente manera:

Con el programa abierto y el diseño en pantalla, se pulsa sobre “Verificar” en la barra de menú y en la pestaña emergente se pulsa en “Verificador de geometría” como muestra la figura 40:

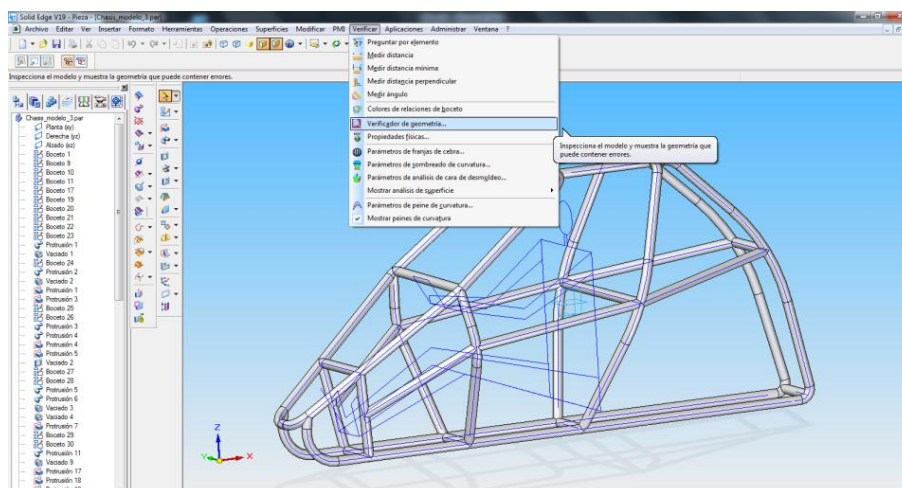


Figura 40: Verificar geometría

Posteriormente aparece una ventana, se pulsa sobre “Ejecutar” y el programa dice si la estructura contiene errores. En este caso, no existe ningún error con lo que se puede afirmar que el diseño es correcto. Se ve a continuación:

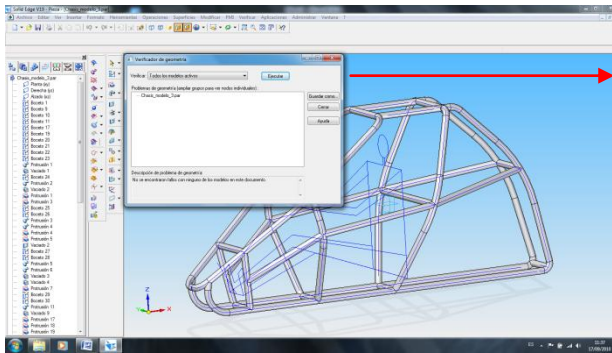


Figura 41: Verificar geometría II

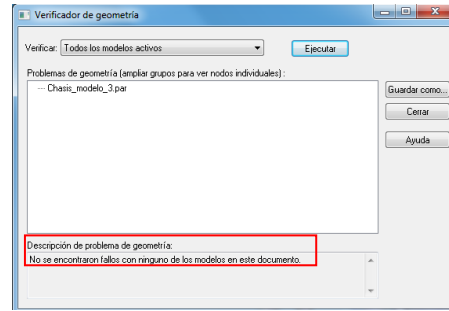


Figura 42: Resultado geometría

Además, para conocer cuáles son las propiedades físicas del modelo, se debe pulsar sobre la barra de menú en “Verificar” y “Propiedades físicas”. Una vez abierta la ventana emergente, se pulsa sobre “Cambiar” para introducir el material, en este caso, acero. Se ve en la figura 43:

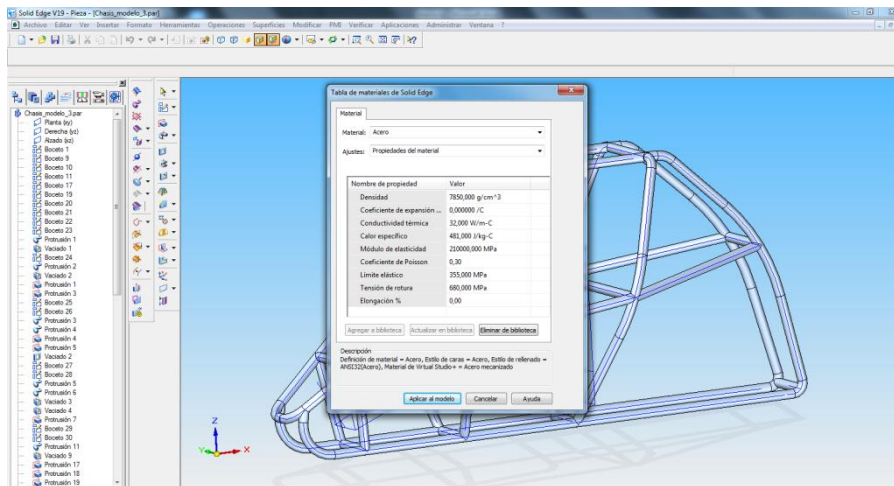


Figura 43: Asignar material al modelo

Por último, se pulsa sobre “Aplicar al modelo” y “Actualizar”. Solid Edge v 19 proporciona una tabla con todas las propiedades físicas de esta estructura:

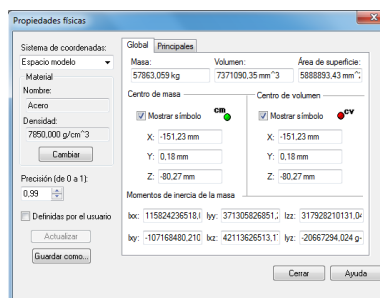


Figura 44: Propiedades físicas



3.4. Fabricabilidad del diseño propuesto y proceso de fabricación.

Antes de analizar si el diseño aguanta las solicitaciones que se exigen en la normativa [6] es necesario comprobar la posibilidad de que el chasis diseñado pueda ser fabricado. El ingeniero calculista debe tener en cuenta las herramientas de las que dispone el calderero, el coste de fabricación, los tipos de tubos que existen en el mercado, el coste de los mismos, los tipos de unión, la posibilidad de curvar los tubos, etc.

Para empezar, según esta normativa, el chasis debe estar construido con tubo de acero al carbono no aleado, estirado en frío, sin soldadura, es decir, que el perfil no debe estar fabricado a partir de una chapa curvada y soldada a lo largo de una línea, y con un contenido máximo en carbono del 0,22%.

Este diseño está realizado con tubo de 40 mm de diámetro y 2,5 mm de espesor, sin variar el diámetro a lo largo de todo el diseño para economizar el proceso de fabricación. Se eligen estas dimensiones porque, aunque el precio del tubo y las características mecánicas son similares de 2 mm (el mínimo exigido) a 2,5 mm, se facilita el proceso de soldadura debido a que el espesor del tubo es mayor y soportará mejor las elevadas temperaturas de fusión que se alcanzan en dicho proceso [13]. Los perfiles tubulares poseen una serie de características generales en cuanto a resistencia se refiere:

- Los perfiles tubulares admiten elementos más esbeltos que los perfiles abiertos para una misma carga de compresión centrada y bajo las mismas condiciones.
- La rigidez a torsión es la más elevada de todos los perfiles comerciales de acero. Por ello, tienen un excelente comportamiento frente al pandeo.
- El comportamiento que poseen los perfiles tubulares frente a flexión se aproxima al de los perfiles IPN.
- El empleo de uniones soldadas en toda su sección hace que dicha sección se utilice al completo a tracción.



- Los perfiles tubulares poseen protección pasiva frente al fuego, es decir, presentan menor superficie expuesta al fuego que los perfiles abiertos, en relación a su masa.

Se trata de un perfil estándar que se encuentra fabricado en varias calidades según la normativa [13]. Para este diseño, se va a escoger un acero de calidad S355 J2H ya que el chasis está destinado a la competición con pruebas muy exigentes en las que la estructura debe aguantar todo tipo de solicitaciones. Las características mecánicas y físicas de este tipo de material se muestran en la tabla 3 [13] y [5]:

PROPIEDADES MECÁNICAS Y FÍSICAS DEL S 355 J0H	
Densidad	7850 kg/m ³
Módulo de Young (E)	210000 MPa
Coeficiente de poisson (ν)	0,3
Coeficiente de dilatación térmica (α)	1,2 10 ⁻⁵ (°C) ⁻¹
Límite de tracción (f _u)	510 ≤ f _u ≤ 680 Mpa
Límite elástico (f _y)	355 MPa
Resiliencia (a -20 °C)	27 J

Tabla 3: Propiedades físicas y mecánicas del acero S 355 J2H

El acero S 355 J2H, acabado en frio, sin soldadura tiene multitud de ventajas sobre otros materiales [13]:

- Atractivo económicamente, comparado con otros materiales como titanio o aluminio.
- Estado de la superficie lisa, resultante de la laminación.
- Estado de la superficie poco calaminada y bien adaptada a la pintura.
- Regularidad del espesor y tolerancias reducidas (inferiores a 5 mm).
- Modo de fabricación adaptado a las exigencias del elevado límite de elasticidad.
- Estructura granular fina.



- Buena soldabilidad.
- Material dúctil, por lo que puede ser curvado.
- Módulo de elasticidad superior al de muchos otros materiales como titanio o aluminio, lo cual aumenta la rigidez para un mismo tamaño de sección.

La unión entre barras será mediante soldadura ya que el perfil exigido por la normativa [6] presenta un contenido en carbono muy bajo y no contiene aleantes, por tanto posee buenas propiedades en cuanto a soldabilidad se refiere. Destacar que los tubos deberán ser preparados en sus bordes para garantizar el perfecto acople con el resto de tubos y facilitar así la tarea de soldadura.

3.4.1. Método de fabricación.

Una vez recibido todo el material y con todo el equipamiento listo, se procede a fabricar el chasis. Para minimizar costes, se deben tener en cuenta aspectos obvios pero en ocasiones omisos, como por ejemplo: las barras deben ser de longitud tal que no existan soldaduras a tope, todo el proceso debe seguir un camino unidireccional para agilizar el proceso, etc.

Las condiciones de suministro son de 6000 mm [13], longitud adecuada al diseño ya que no existen barras en el modelo de mayor longitud como para tener que realizar soldaduras a tope.

3.4.1.1 Corte de los perfiles.

El primer paso que se debe dar en el proceso de fabricación es el corte de los perfiles circulares, que se puede realizar con varias herramientas:

- **Sierra de banda:** permite realizar cortes exactos con un acabado excelente y con poco peligro para el operario. Poseen además lubricante para disminuir la temperatura de corte.



Figura 45: Sierra de banda

- **Sierra de disco:** más económica que la anterior pero menos precisa y algo peligrosa, por la posibilidad de rotura del disco de corte en el proceso.



Figura 46: Sierra de disco

- **Soplete:** el cual deja un acabado bastante malo y sería necesario preparar el corte con un desbarbado, lo que encarecería el proceso.



Figura 47: Soplete

Como se ha mencionado anteriormente, al finalizar el proceso de corte es necesario preparar el borde del perfil para que asiente correctamente en otro (salvo que la unión con otro perfil sea “a tope”, con lo que no sería necesario preparar el borde). Por ello se realiza un acabado que se denomina “silla de montar” por su parecido a una silla de montar a caballo. Esto necesita de máquinas y útiles específicos por lo que, en ocasiones, para abaratar el proceso, se sustituye por varios cortes planos, los cuales no asientan correctamente pero quedan perfectamente unidos en el proceso de soldadura.

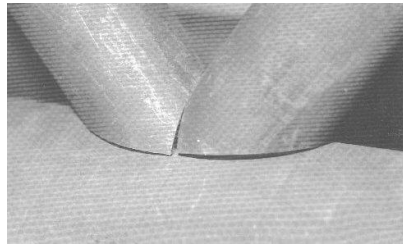


Figura 48: Preparación de bordes

3.4.1.2 Curvado de los perfiles.

Para proceder al curvado de los tubos, se deben tener muy en cuenta los problemas que pueden aparecer, como pliegues en la zona interna del tubo y reducción del espesor en la zona externa.

Las máquinas que normalmente se usan para hacer este tipo de proceso son dos:

- **Curvadora hidráulica:** posee una matriz que empuja al tubo contra unos bulones que hacen de tope y que se pueden regular para modificar el radio de curvatura y el ángulo. La fuerza es generada por un bombín hidráulico que generalmente oscila entre 12 y 16 toneladas.



Figura 49: Curvadora manual hidráulica

- **Curvadora de rodillos:** como el propio nombre indica, posee tres rodillos que curvan el perfil según convenga.



Figura 50: Curvadora de rodillos

3.4.1.3 Unión de los perfiles.

La unión que recomienda el fabricante para perfiles tubulares es la soldadura. El tipo de soldadura que se empleará es por arco metálico con electrodo revestido en la cual, el material de aporte es un electrodo cubierto por un aislante que protegerá al proceso de formación de la soldadura y, una vez fundido, se deposita en el cordón de soldadura formando una capa de escoria que deberá ser eliminada posteriormente.



Figura 51: Equipo de soldar

Para evitar problemas de rotura de la unión por concentración de tensiones, se deben utilizar electrodos cuya resistencia a la tracción sea mayor que la resistencia a tracción de los tubos, para garantizar que, a la hora de comparar los resultados que proporciona Pro Engineer con la resistencia del material, la unión no sufrirá rotura alguna. Por tanto, como la tensión de rotura máxima del acero S 355 J2H es de 680 MPa [13], el electrodo que se usará deberá tener una resistencia a tracción mayor de 680 MPa. Para ello, se ha consultado documentación [20] sobre electrodos que siguen la normativa AWS y se ha llegado a la conclusión de que el electrodo óptimo a usar es el E 110-18, donde:

- E = Electrodo para soldadura eléctrica manual.
- XXX: significa el límite de tracción del material del electrodo tras la soldadura $\times 10^3$ en psi (lib/pulg²). Para este caso, 110.000 psi, lo que equivale a 758,4 MPa > 680 MPa del perfil de acero.
- XX: el primer dígito tras el guión especifica las posiciones de soldeo para el electrodo y el segundo el tipo de corriente. Para este caso, el 1 especifica que todas las posiciones de soldeo están admitidas y el 8 CC y CA.



Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de comenzar el proceso de soldadura es el de la soldadura por puntos. El punteo consiste en realizar a cada tubo pequeñas soldaduras para fijarlo provisionalmente y poder así unir varios perfiles, observar y medir su posición, y si es correcta, aplicar el cordón definitivo.

Una vez soldada la estructura, es necesario inspeccionar cada una de las soldaduras para ver si se ha cometido algún fallo en el proceso y pueden estar defectuosa. Existen multitud de ensayos no destructivos, como partículas magnéticas, líquidos penetrantes, etc., lo que eleva el coste de fabricación. Por tanto, la inspección visual es la única que se lleva a cabo, siendo necesaria la colaboración de una persona debidamente formada para evaluar el resultado.

3.4.1.4 Preparación superficial y pintado.

Una vez fabricada la estructura resulta imprescindible pintarla, tanto por la estética como por la protección frente a la corrosión. Para ello, debemos preparar correctamente la superficie con diversas manos de lijado y aplicar imprimaciones metálicas que sirven como base a la pintura final, la cual protegerá de la corrosión al acero ya que se enfrenta a distintos tipos de ambientes en la competición.

Por todo ello, se puede afirmar que es posible fabricar el chasis ya que el acero cumple con todos los requisitos expuestos anteriormente.



CAPÍTULO 4:

Análisis del chasis



4. Análisis del chasis.

4.1 Métodos de los Elementos Finitos (MEF).

El análisis por elementos finitos es un método para predecir el comportamiento de un objeto del mundo real, ante un conjunto de acciones tales como fuerzas, campos de temperatura, etc.

Este método consiste en discretizar una región continua, dando lugar a una red de nodos conectados entre sí a través de formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Así, las propiedades del material y sus ecuaciones constitutivas son consideradas sobre esos elementos según una serie de cargas y restricciones previamente aplicadas (condiciones de contorno). La solución al sistema global se representará de forma continua.

De este modo, el método de elementos finitos nos servirá para predecir el comportamiento de cualquier sistema y su relación con diferentes fenómenos físicos: tensiones, desplazamientos y vibraciones mecánicas, transferencia de calor (conducción, convección y radiación), flujos de fluidos (líquidos y gaseosos), fenómenos acústicos, electromagnéticos, etc.

4.1.1. Fundamentos del método de los elementos finitos.

Las limitaciones de la mente humana son tales que no puede captar el comportamiento del complejo mundo que la rodea en una sola operación global. Pero aun con limitaciones, la mente humana es imaginativa y ha conseguido sortear este obstáculo separando los sistemas en sus componentes (o elementos) individuales, cuyo estudio puede ser más accesible, y a partir de estos reconstruir el sistema original.

Esta es la forma de proceder que ha adoptado el hombre durante su evolución, de forma que cuando trata de describir cuantitativamente un fenómeno, plantea el modelo físico y a partir de él construye uno matemático que le permita estudiarlo más cómodamente. Si bien en muchos casos este modelo matemático utiliza un número finito de variables (problemas discretos), en otros es necesario un número infinito de ellas (problemas continuos).



Para superar la dificultad que plantean estos segundos, existen métodos numéricos de resolución de ecuaciones diferenciales que reemplazan el sistema continuo por uno discreto de forma que el problema se reduce a resolver un sistema algebraico de ecuaciones con un número importante de incógnitas, pero que con la ayuda de los ordenadores se convierte en un problema abordable. Sin embargo, el inconveniente de pasar de un número infinito de variables a uno finito se traduce en soluciones aproximadas pero no exactas.

En resumen, el método de los elementos finitos reproduce de forma aproximada lo que sucede en la realidad a partir de la resolución numérica del sistema de ecuaciones matemáticas que describe dicha realidad.

Para efectuar esta aproximación y convertir así un problema continuo en uno discreto, el método es el siguiente :

- El continuo se divide, mediante líneas, superficies o volúmenes imaginarios, en un número de “elementos finitos”.
- Los elementos estarán conectados entre sí mediante un número finito de puntos, que llamaremos “nodos”, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema.
- Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito”.
- Estas funciones de desplazamientos definirán el estado de deformación dentro del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las deformaciones iniciales y las propiedades constitutivas del material, definirán el estado de tensiones en todo el elemento y, por consiguiente, también en sus contornos.
- Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y cualesquiera cargas repartidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos.



Queda por comentar la imposición de las condiciones de contorno correspondientes, pudiendo estar estas aplicadas a nodos, aristas o superficies de un modelo. Durante el análisis del modelo se generará una ecuación por cada grado de libertad de cada nodo.

De esta forma, a la hora de resolver un problema mediante el método de los elementos finitos, se seguirán normalmente tres etapas:

- **Preproceso.** En esta primera etapa se construye el modelo y se deja indicada toda aquella información que sea necesaria para el análisis del mismo: geometría, propiedades de los materiales, condiciones de contorno (cargas y desplazamientos impuestos) y discretización del dominio en elementos finitos (mallado).
- **Resolución.** Esta etapa es la que tiene que ver más con el cálculo numérico y para la que es realmente imprescindible el uso de ordenadores. En ella se generan las ecuaciones que describan el comportamiento de los elementos finitos (funciones de forma), se ensamblarán en una sola matriz denominada matriz de rigidez y se resolverá el sistema de ecuaciones que nos permita conocer el comportamiento del fenómeno estudiado.
- **Postproceso.** En esta tercera y última etapa se hace un análisis gráfico y numérico de los resultados obtenidos a partir de la resolución del sistema de ecuaciones.

A partir de la década de los 80, el método de los elementos finitos se convirtió en una de las herramientas más poderosas al alcance de todo tipo de ingenieros, permitiéndoles resolver numéricamente un gran número de problemas de ingeniería. Y más aún a partir de la incorporación de la simulación de eventos mecánicos o MES (Mechanical Events Simulation) al mundo de la simulación por ordenador, que incluye la posibilidad de un análisis dinámico por medio de la simulación del movimiento (cargas y restricciones variables en el tiempo, proporcionando resultados -tensiones, desplazamientos, deformaciones, etc.- también en función del tiempo), y análisis multifenómeno (transmisión térmica, flujo de fluidos o electrostático). Así como otras mejoras



añadidas a la simulación más tradicional. Sus aplicaciones van desde el campo de la automoción, la aeronáutica o la construcción, hasta el análisis de los campos del flujo de calor, magnético y de fluidos.

Gracias a los avances tecnológicos en materia de ordenadores y sistemas CAD, en la actualidad es posible modelar problemas complejos con relativa facilidad y ensayar varios modelos alternativos antes de construir el primer prototipo, lo que supone una disminución del coste de fabricación.

Es importante destacar también que una de las características más atractivas de este método, aunque también una de las más peligrosas, es el hecho de tratarse de un método aproximado. Esto implica que, lo que en manos de un técnico experimentado es una herramienta muy potente para la obtención de información acerca del comportamiento de modelos complejos, en manos de alguien no tan experimentado puede tratarse de una herramienta que desconcierte y confunda al técnico con valores erróneos. Por lo tanto, su utilización se debe tomar siempre con cierta precaución y comprobando que los resultados obtenidos son coherentes y similares a lo que cabría esperar.

4.2. Algoritmo de cálculo.

El algoritmo de cálculo para el análisis se ve en la figura 52:

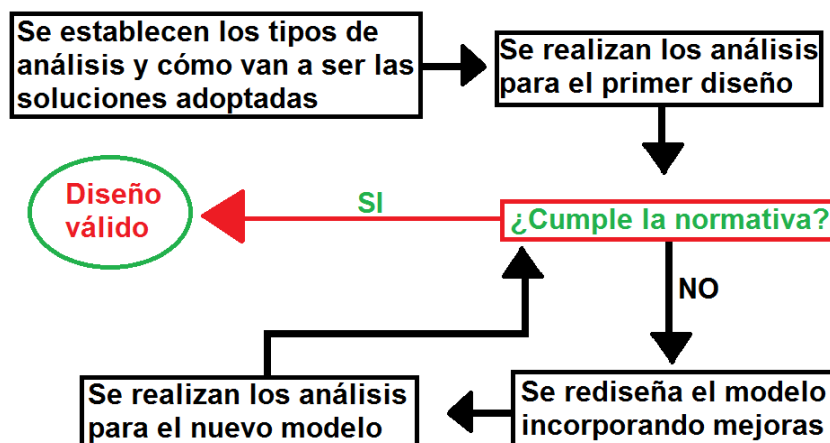


Figura 52: Algoritmo de cálculo



4.3 Ensayos establecidos por la norma.

Una vez realizado el diseño, se ha visto la influencia que tiene la fabricación en el mismo. Es inútil analizar una estructura y certificar que soporta los esfuerzos exigidos si resulta difícil su fabricación, bien sea porque los costes son elevados, porque resulta difícil su montaje, etc. Por tanto, comprobado todo lo anterior, llega el momento del análisis, que será realizado con el software ProEngineer W5.

La normativa [6], en el Anexo I de estructuras antivuelco expone que, para homologar un chasis de carcass se deberá presentar un estudio de resistencia de materiales firmado por un técnico cualificado colegiado, en el que se demuestre que dicha estructura resiste las siguientes solicitaciones:

- 8 veces su peso verticalmente (8P)
- 6 veces su peso longitudinalmente en ambos sentidos (6P)
- 2 veces su peso lateralmente (2P)

Siendo $P = 75 \text{ kg} + \text{peso del vehículo en condiciones de carrera}$.

Una vez hecho esto, se deberá comprobar que no existe rotura en ninguno de los tres casos, ni deformación superior a los siguientes valores medidos bajo carga:

- Verticalmente, 50 mm a lo largo del eje de aplicación de la carga.
- Longitudinalmente, 100 mm a lo largo del eje de aplicación de la carga.
- Lateralmente, 50 mm a lo largo del eje de aplicación de la carga.

Si en alguno de los tres análisis anteriores, el chasis diseñado no cumple los requisitos establecidos, ya sea en tensión o deformación, se deberá rediseñar la estructura incorporando nuevas mejoras debidamente justificadas, según indica el algoritmo de cálculo.

El peso del vehículo resulta difícil calcularlo puesto que no se dispone de la totalidad de sus partes, por tanto, se va a estimar un peso aproximado del vehículo y se le aplicará un coeficiente de seguridad.



La normativa [6] exige que el peso mínimo del vehículo en condiciones de carrera debe ser 310 kg. Teniendo en cuenta que, según la experiencia, este peso es fácilmente respetable, es decir, se puede construir un vehículo tipo carcass más ligero aún sin ningún problema, se tomará este peso como válido y para asegurar el resultado final, se le aplicará un coeficiente de seguridad de 1,2. El resultado final es el siguiente:

$$P = 75 \text{ kg} + \text{Peso}_{\text{vehículo}}$$

$$P = 75 \text{ kg} + (\text{Coef. seguridad} \times \text{Peso}_{\text{mínimo}}) = 75 \text{ kg} + (1,2 \times 310 \text{ kg}) = 447 \text{ kg}$$

$$P = 447 \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 4380,6 \text{ N} \quad \text{donde,}$$

$\text{Peso}_{\text{vehículo}}$: es el peso de vehículo estimado, es decir, con el coeficiente de seguridad incluido.

$\text{Peso}_{\text{mínimo}}$: es el peso mínimo del vehículo en condiciones de carrera que dicta la normativa [6].

P : es la carga que se aplica a la estructura en los diferentes ensayos.

Una vez estimado el peso, llega el momento de realizar el análisis de la estructura.

4.4. Fases del análisis del chasis.

Antes de analizar la estructura, se va a explicar cómo es el entorno de ProEngineer W5 y qué pasos se deben seguir para realizar el análisis de cualquier estructura [3]. Únicamente se pide análisis estático pero este software permite más variantes como fatiga, modal, vibratorio, etc.

Una vez abierto el programa, se pulsa sobre “Abrir”, se busca el archivo que se va a analizar y se acepta. En este caso, el archivo que se quiere abrir procede de Solid Edge V19, software distinto a ProEngineer W5. Por tanto, en la pestaña “tipo” se debe seleccionar “todos los ficheros” y escoger el archivo en cuestión guardado previamente con la extensión “.igs”. La figura 53 muestra lo explicado:

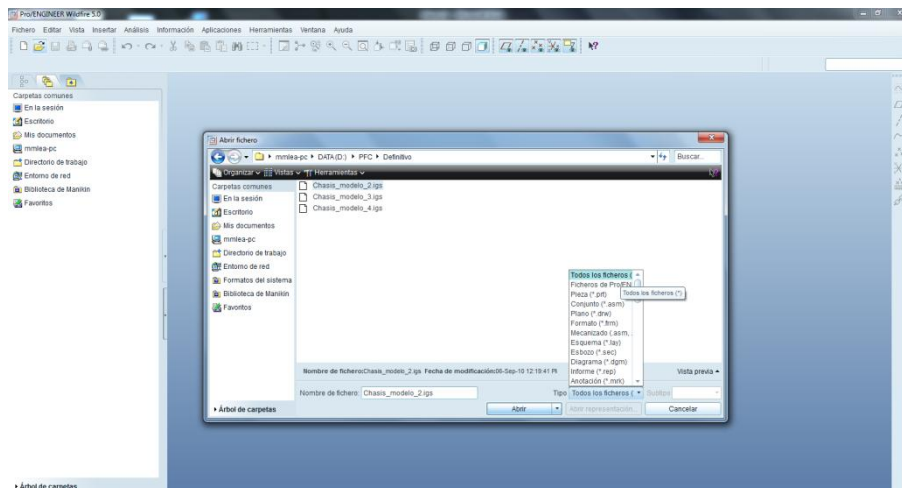


Figura 53: Abrir archivos “*.igs” en PEW5

Una vez aceptado, se abre el archivo seleccionado en modo diseño. Este modo permite hacer cambios en el diseño, añadir nuevas operaciones, etc. Debido a que la estructura que se quiere analizar está totalmente diseñada y verificada a prueba de errores, se debe pasar al módulo de mecánica. Para ello, en la barra de menú, se pulsa sobre “Aplicaciones” y “Mechanica”, como se muestra en la figura 54:

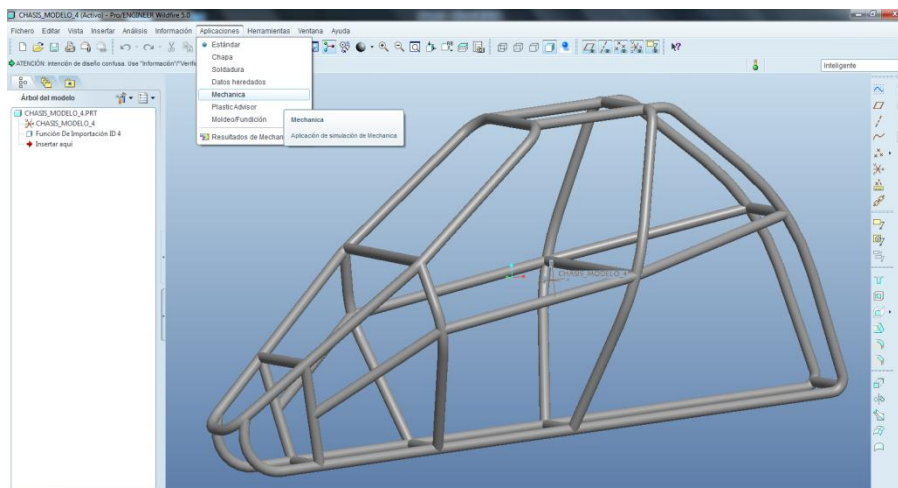


Figura 54: Acceso al módulo “Mechanica”

Una nueva ventana aparece la cual se acepta sin ningún tipo de modificación, ya que trata sobre cómo va a ser el tipo de análisis, es decir, si será térmico o estructural. Se deja esta última opción como válida:

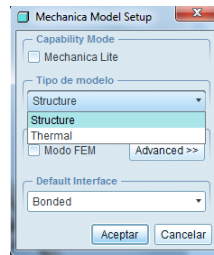



Figura 55: Tipo de análisis

Una vez aceptado, el programa se inicia en el módulo “Mechanica”. Este módulo posee numerosas opciones, entre las cuales se encuentran: tipos de cargas, de apoyos, selección de material, etc. A continuación se va a explicar detalladamente los cinco pasos que se deben seguir para realizar un análisis estático:

4.4.1 Selección y aplicación del material.

Lo primero que se debe hacer es seleccionar el material. Para ello se pulsa sobre la tecla  y se abre una ventana con toda la librería de materiales disponible. Se selecciona el material deseado, para este caso, como se trata de acero, se pulsa sobre “steel”, se graba haciendo click en la doble flecha que mira hacia la derecha y se acepta. Además, se puede crear un material nuevo o de editar uno de la biblioteca. En la figura 56 se muestra lo explicado:

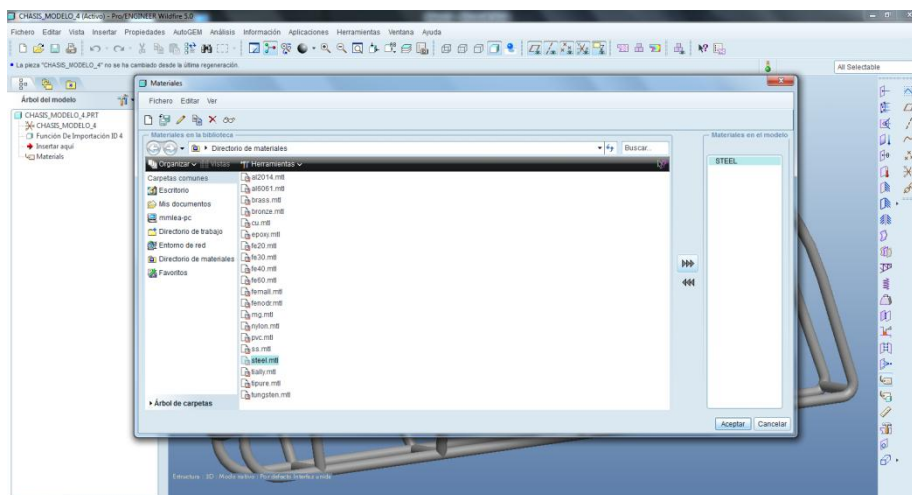



Figura 56: Biblioteca de materiales



Una vez escogido el material, llega la hora de aplicarlo al modelo. Para ello, se debe pulsar sobre  y en la ventana emergente, se selecciona el modelo activo y se acepta (debe aparecer una etiqueta amarilla en el centro de la estructura indicando que el material ha sido aplicado con éxito).

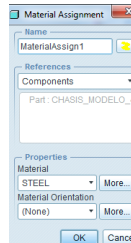



Figura 57: Aplicar material

4.4.2. Aplicación de cargas.

Para aplicar las cargas pulsamos sobre . Se abre la ventana siguiente:

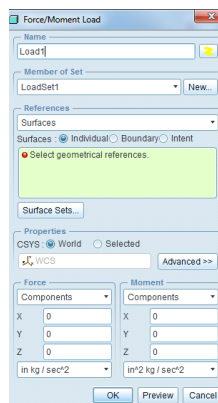


Figura 58: Menú de cargas

En primer lugar se puede poner el nombre de la carga. A continuación, se debe seleccionar “surfaces” y pulsar sobre el modelo aquellas superficies que deben ser cargadas (si son varias, mantener pulsada la tecla “Ctrl”). Una vez hecho esto, se introduce el valor de la carga en el eje correspondiente (positivo si es en el sentido del eje o negativo si es en sentido contrario) y antes de aceptar, seleccionar en qué unidades está expresada la carga (Newton en este caso).

Tras aceptar, el modelo queda cargado y se representa con flechas amarillas como muestra la figura 59:

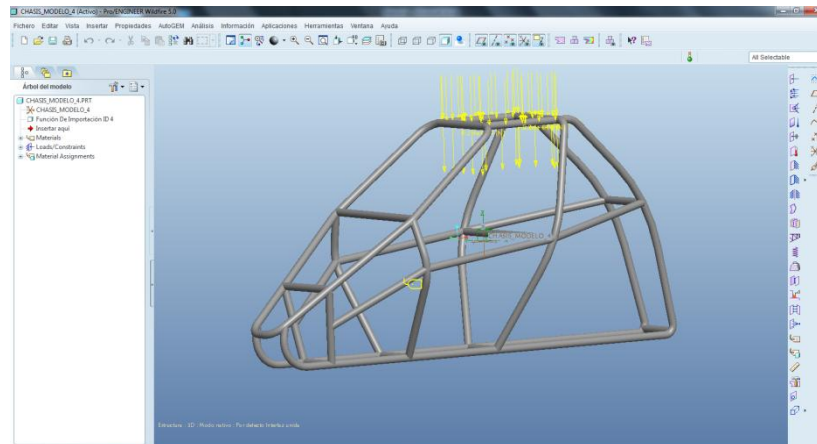



Figura 59: Modelo cargado

4.4.3. Aplicación de restricciones.

Para aplicar las restricciones, que en este caso serán de tipo empotramiento en la zona opuesta a la aplicación de la carga, se pulsa sobre  y aparece de nuevo una ventana de similares características a la del paso anterior:

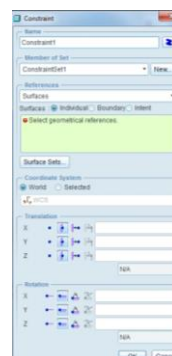


Figura 60: Restricciones del modelo

Nuevamente se puede poner el nombre de la restricción. A continuación, se debe seleccionar “surfaces” y pulsar sobre el modelo aquellas superficies que deben ser restringidas (si son varias, mantener pulsada la tecla “Ctrl”). Una vez hecho esto, se deja todo por defecto ya que vienen restringidos todos los grados de libertad, por lo que se trata de un empotramiento. Se acepta y aparece en el modelo lo siguiente:

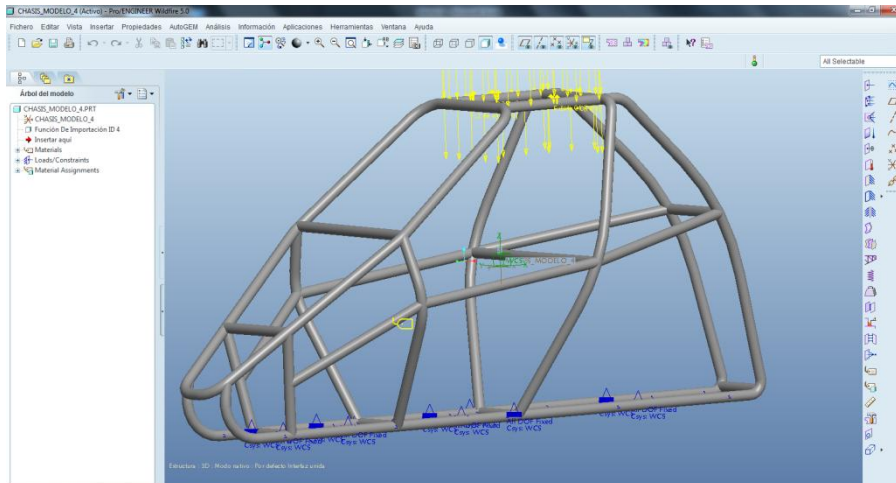


Figura 61: Modelo previo al mallado

Los triángulos azules representan el empotramiento en la zona inferior. Como se puede observar, aparecen unas letras al lado del símbolo donde se puede leer ALL DOF (Degrees Of Freedom). Esto significa que están restringidos todos los grados de libertad.

4.4.4. Creación de la malla.

En todos los programas de elementos finitos se debe crear una malla en el modelo a analizar, es decir, dividir en elementos muy pequeños (discretizar) las partes que componen el modelo, en este caso barras, para poder aplicar todas las condiciones impuestas en cada uno de esos elementos. Cuanto más pequeño sea el tamaño del elemento, más fina será la malla y más fiables serán los resultados, pero más tardará el ordenador en llegar a la solución.

Existen programas de elementos finitos como ANSYS o SOLIDWORKS que exigen al usuario la creación de dicha malla, estableciendo de manera manual el tamaño de elemento hasta que el programa sea capaz de analizar el modelo. Pro Engineer posee, entre otras, la ventaja de que crea la malla automáticamente, es decir, es el propio programa el que dice cuál es el tamaño de elemento y qué cantidad de los mismos hay en el modelo [15].

Para crear la malla en Pro Engineer, pulsamos en la barra de menú sobre “AutoGEM” y después en “Crear”. Se abre una ventana, en ella se pulsa sobre “Create” como muestra la figura 62:

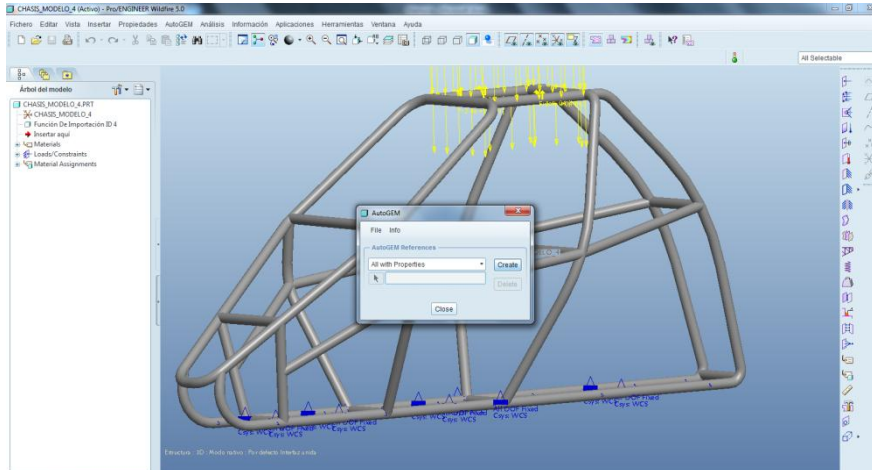


Figura 62: Creación de la malla

De forma automática, Pro Engineer W5 comienza a calcular la malla. Esta fase tarda unos minutos en realizarse ya que el número de elementos que debe generar es del orden de 10^5 , dependiendo del modelo. Una vez terminado el mallado, el programa muestra en pantalla el resultado con una tabla resumen, en el que se incluye: número de elementos, número de bordes, tamaño de elemento, etc.

Una vez creada la malla, se debe guardar para que sea la misma en cada uno de los ensayos.

4.4.5. Análisis estático.

Llegado el momento del análisis y teniendo todos los pasos anteriores bien definidos, se pulsa en la barra de menú sobre “Análisis” y “Análisis/Estudios de mecanica...” como muestra la figura 63:

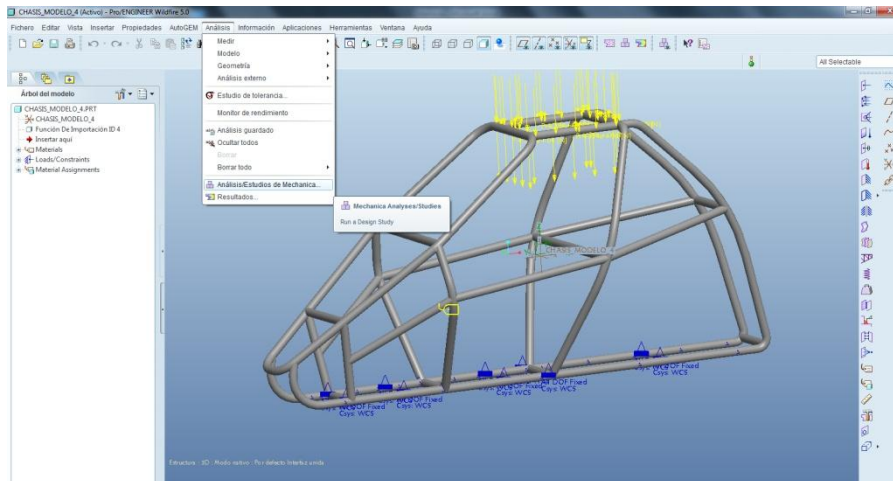


Figura 63: Análisis/Estudios de “Mechanica”

A continuación se abre una ventana en la que se puede seleccionar el tipo de análisis. En este caso, se pulsa sobre “File” y “New static” y se abre una nueva ventana con las características del análisis. Las figuras muestran el resultado:

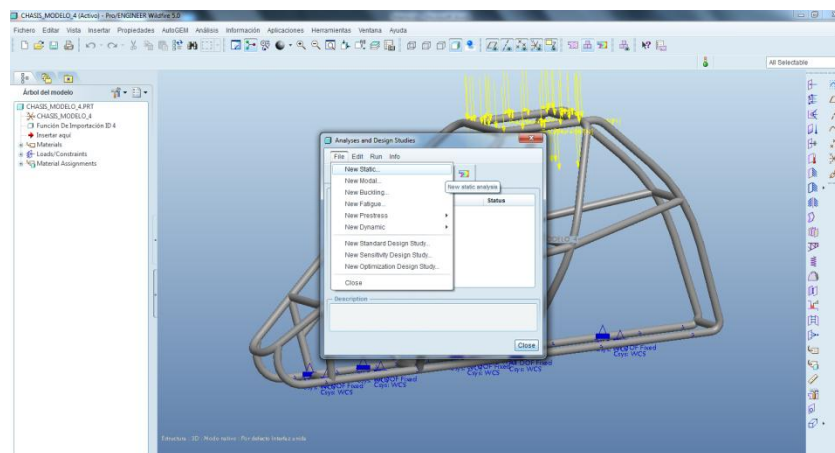


Figura 64: Entorno de análisis

La figura 65 muestra las opciones del análisis:

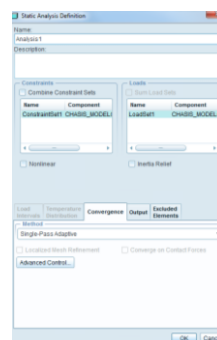


Figura 65: Nuevo análisis estático

En esta última ventana, se puede modificar el nombre del análisis, seleccionar qué cargas y restricciones se van a usar para dicho análisis y también elegir el tipo de convergencia. Se dejan por defecto todas las opciones y se acepta.

A continuación pulsamos sobre “Run” y “Setting” para modificar la memoria que usará el programa para hacer los cálculos y la cual dependerá del ordenador que se use:

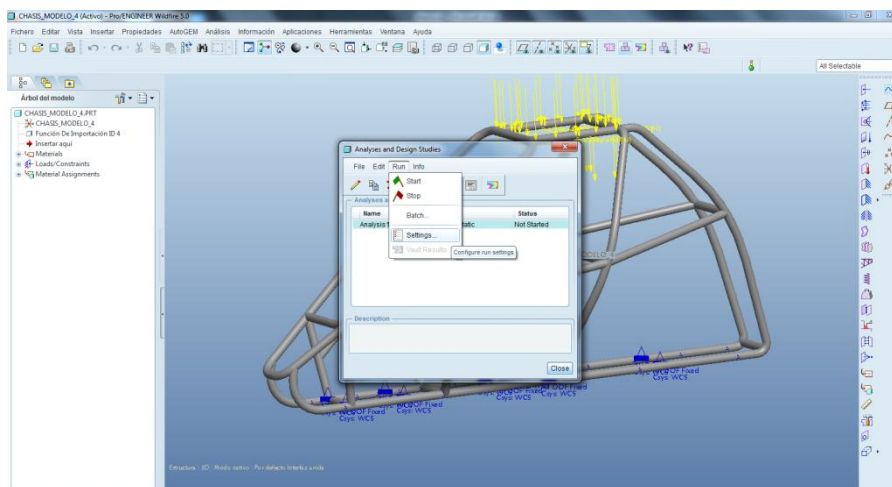




Figura 66: “Setting” del análisis

Por último, se pulsa sobre el botón start  y el análisis comienza. Si se pulsa sobre “Info” y “Status” se abre un cuadro de texto que indica cómo va el proceso, el tiempo que emplea en calcular las tensiones, los desplazamientos, cuántos elementos convergen, etc.

4.4.6. Obtención de resultados.

Terminado el análisis, es necesario observar gráficamente los resultados ya que se deben comparar con la resistencia del material y ver si la estructura aguanta las solicitaciones o no. Para ello, se pulsa sobre  y se abre la siguiente ventana:

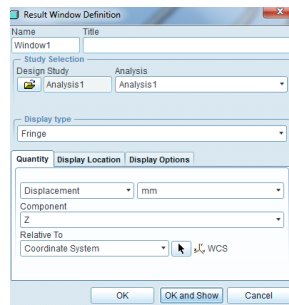


Figura 67: Menú de resultados

En la figura 67, se puede seleccionar que el programa muestre en pantalla la tensión, el desplazamiento (en módulo o en un eje), etc. Si se pulsa en “Display options” se puede elegir que la estructura salga deformada, animada o no, y muchas otras opciones de visualización. Cuando se ha terminado la selección, se pulsa en “Ok a Show” para que se muestre en pantalla el modelo analizado.



CAPÍTULO 5:

Resultados



5. Resultados.

A continuación se van a mostrar los resultados del análisis del chasis previamente modelado. Para ello, se va a describir la teoría a seguir para comparar los resultados con los valores límites del material, y poder decidir entonces si el chasis cumple la normativa o no.

5.1. Criterio de Von Mises.

Los criterios de rotura para materiales frágiles generalmente se basan en comparar ciertas magnitudes que se producen en un ensayo de tracción (compresión) cuando se alcanza la rotura, con estas mismas magnitudes para un estado cualquiera de tensiones.

El material empleado en este modelo es un acero S 355 J2H, cuya tensión límite de tracción es de 680 Mpa. El comportamiento real de este material es dúctil. Las teorías de fallo para materiales dúctiles no comparan límites de tracción, comparan límites de elasticidad, que para este material es de 355 MPa. Por tanto, como la normativa [6] exige que los resultados se comparen con valores de rotura, cualquier elemento del modelo cuya tensión sobrepase los 355 MPa, según el criterio de plastificación de Von Mises [18], estará en la zona plástica. Pero si no sobrepasa el valor límite de 680 MPa, significa que no ha llegado a la rotura, por lo que se aceptará como válido el ensayo.

5.2. Tipos de análisis.

A continuación se mostrarán los tres tipos de análisis que deben realizarse para homologar la estructura. No se detallarán los pasos de cada uno de ellos porque todos se hacen de forma similar, por lo que estarán enfocados a decidir si cumplen con las condiciones descritas anteriormente.

5.2.1 Análisis de carga vertical.

Para llevar a cabo este análisis, se ha decidido empotrar las barras longitudinales inferiores del vehículo y aplicar la carga en la parte superior del mismo, con dirección del eje Z y sentido negativo, es decir, con las flechas de

la carga mirando hacia el empotramiento. Las características de este análisis son:

Solicitación: $8P = 8 \times 4380,6 \text{ N} = 35044,8 \text{ N}$, de signo negativo a lo largo del eje Z.

Resistencia: La estructura no debe llegar a la rotura, es decir, la tensión máxima alcanzada en el análisis no debe superar el límite de rotura (f_u) para el acero S 355 J2H ni debe tener una deformación bajo carga inferior a 50 mm medidos a lo largo del eje Z, ya que es el eje de aplicación de la carga.

5.2.1.1 Diseño 1:

El diseño 1 corresponde al primer chasis diseñado y que servirá como punto de partida para el análisis. En caso de no cumplir la normativa, se procederá a rediseñarlo, teniendo en cuenta todos los criterios que se impusieron, tanto de diseño como de fabricación. La figura 68 muestra el resultado:

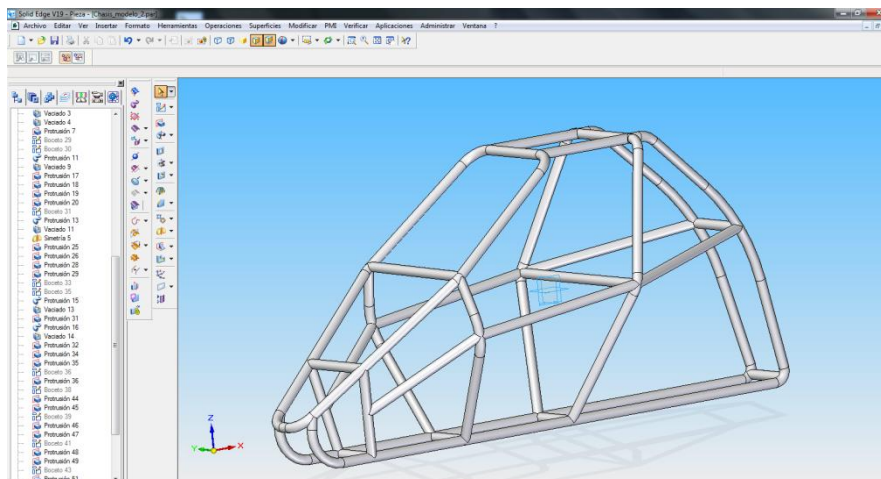


Figura 68: Diseño 1 en SEV19

En la figura 69 se muestra el resultado previo al análisis en el programa Pro Engineer, para observar cómo se han situado las cargas y restricciones:

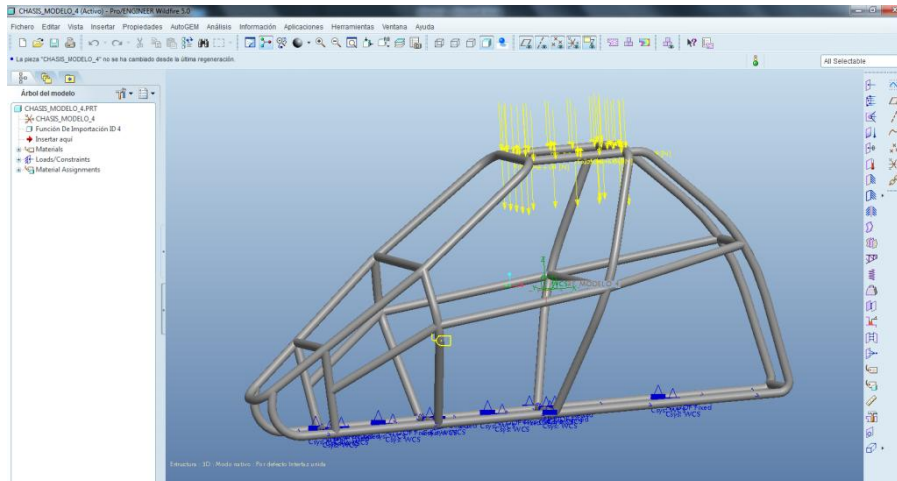


Figura 69: Diseño 1 antes de analizar

En la figura 69 se puede ver que en la parte superior del chasis es donde se encuentra aplicada la carga vertical con sentido negativo del eje Z y en la parte inferior las restricciones. Con esta disposición se consigue modelizar el primer análisis.

A continuación se realiza el análisis y los resultados obtenidos son:

- **Desplazamientos en el eje Z:**

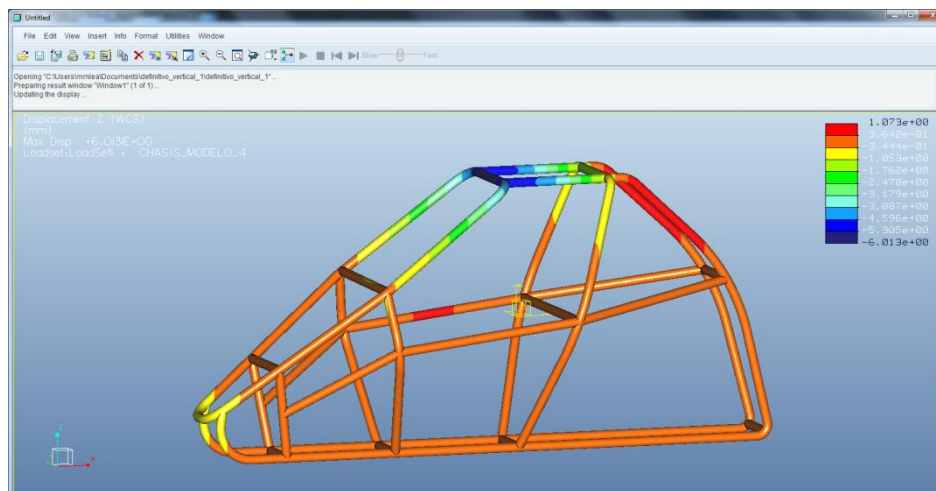


Figura 70: Desplazamientos en el eje Z del Diseño 1

La figura 70 muestra el máximo desplazamiento en la parte superior de la estructura (tiene signo negativo porque la fuerza esta aplicada en sentido negativo del eje Z) con un valor de 6,013 mm, inferior al límite, cuyo valor es de 50 mm para este análisis.

Por tanto, el diseño 1 cumple la normativa en cuanto a desplazamiento se refiere debido a:

$$\delta_{\text{eje Z}} = 6,013 \text{ mm} < \delta_{\text{límite}} = 50 \text{ mm}$$

- **Tensiones de Von Mises:**

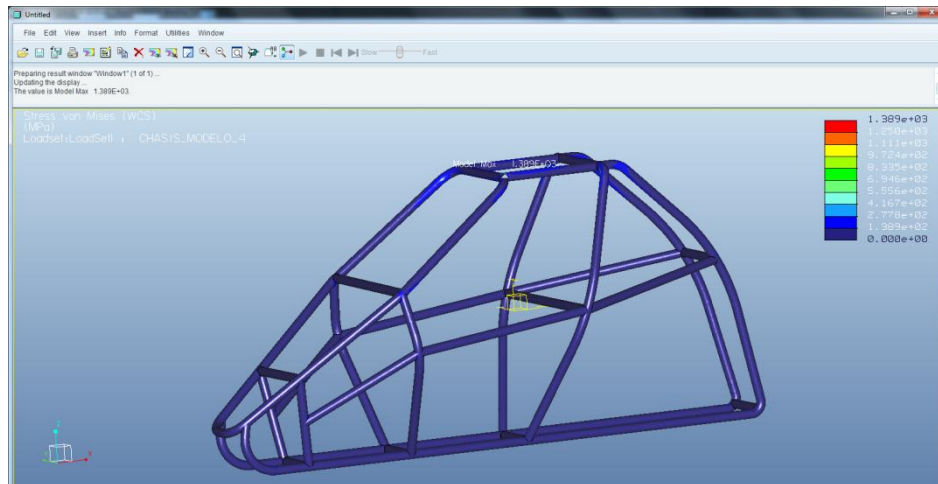


Figura 71: Tensión de Von Mises del Diseño 1

La figura 71 muestra la máxima tensión de Von Mises del chasis en la parte superior de la estructura, ya que es donde está aplicada la fuerza. Esta tensión tiene un valor de 1389 Mpa, superior al límite de rotura del acero, cuyo valor es de 680 Mpa. En la figura 72 podemos ver un detalle de la posición exacta:

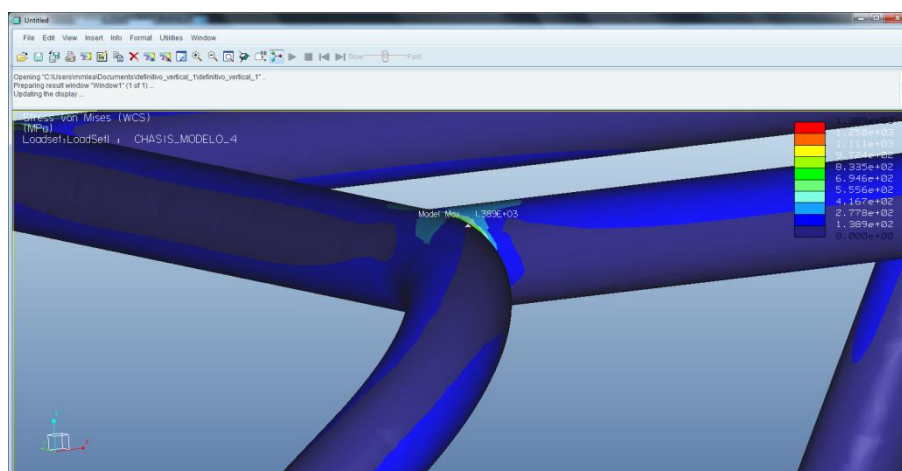


Figura 72: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 1

Por tanto, el diseño 1 no cumple con la normativa en cuanto a tensión se refiere debido a que sobrepasa el límite de rotura del material:

$$\sigma_{\text{vonmises}} = 1389 \text{ Mpa} > f_u = 680 \text{ Mpa}$$

Debido a que el diseño 1 no cumple la normativa, según el algoritmo de cálculo, se debe rediseñar el chasis introduciendo mejoras debidamente justificadas.

5.2.1.2 Diseño 2:

El diseño 2 incorpora dos tubos inclinados, formando un triángulo con las barras que unen los semiarcos, ya que uno de los requisitos de diseño era triangularizar la estructura. Los tubos están inclinados un ángulo de $22,4^\circ$ grados con respecto a las barras superiores, ángulo que no impide la evacuación del piloto en caso de sufrir un accidente. En la figura 73 muestra el resultado:

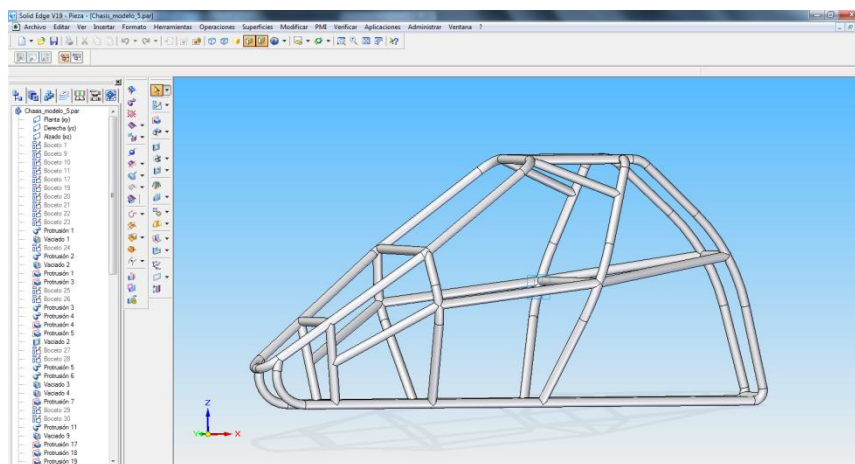


Figura 73: Diseño 2 en SEV19

En la figura 74 se muestra el resultado previo al análisis, para observar cómo se han situado las cargas y restricciones:

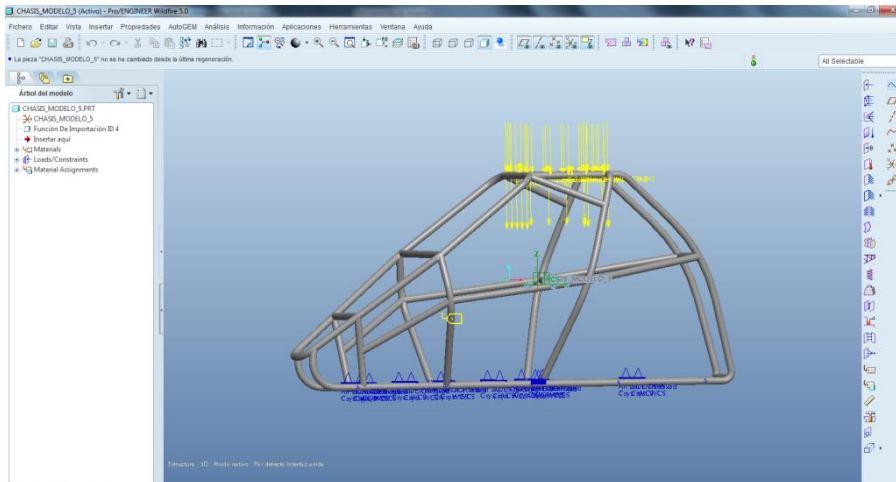


Figura 74: Diseño 2 antes de analizar

En la figura 74 se puede ver que las cargas y restricciones no varían con respecto al anterior diseño ya que el análisis es el mismo.

A continuación se realiza el análisis del nuevo diseño y los resultados obtenidos son:

- **Desplazamientos en el eje Z:**

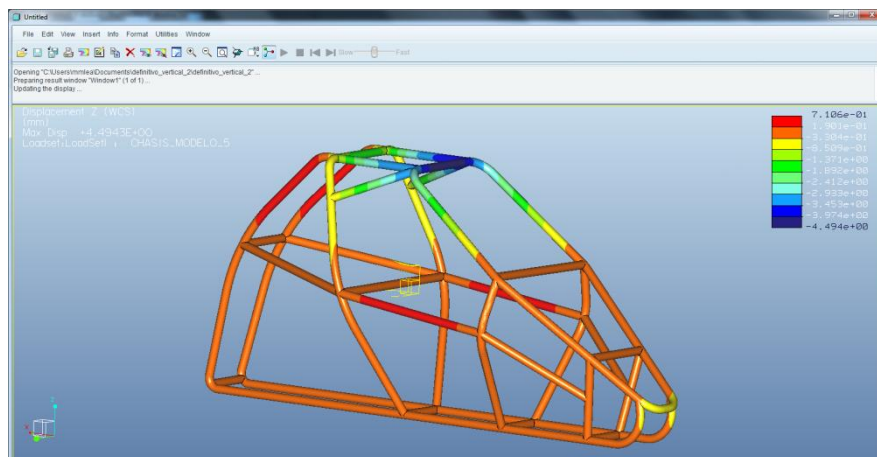


Figura 75: Desplazamientos en el eje Z del Diseño 2

La figura 75 muestra el desplazamiento máximo, el cual se localiza en la parte superior de la estructura (tiene signo negativo porque la fuerza esta aplicada en sentido negativo del eje Z) con un valor de 4,49 mm, inferior al límite, cuyo valor es de 50 mm para este análisis.

Por tanto, el diseño 2 cumple la normativa en cuanto a desplazamiento se refiere debido a:

$$\delta_{\text{eje } z} = 4,49 \text{ mm} < \delta_{\text{límite}} = 50 \text{ mm}$$

- **Tensiones:**

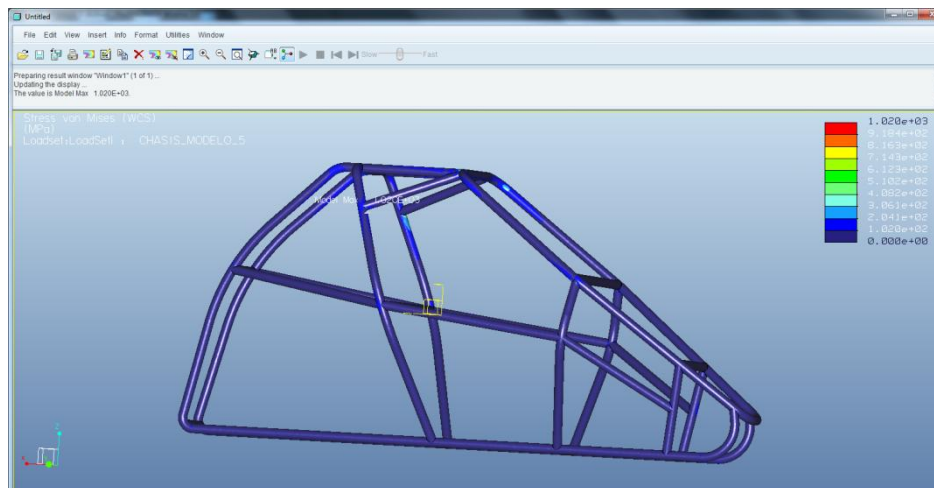


Figura 76: Tensión de Von Mises del Diseño 2

La figura 76 muestra la tensión máxima de Von Mises del diseño 2, la cual se localiza en la unión de los nuevos tubos con el arco central de la estructura. Esta tensión tiene un valor de 1020 Mpa, inferior a la tensión de Von Mises del diseño 1, pero superior al límite de rotura del acero nuevamente, cuyo valor es de 680 Mpa.

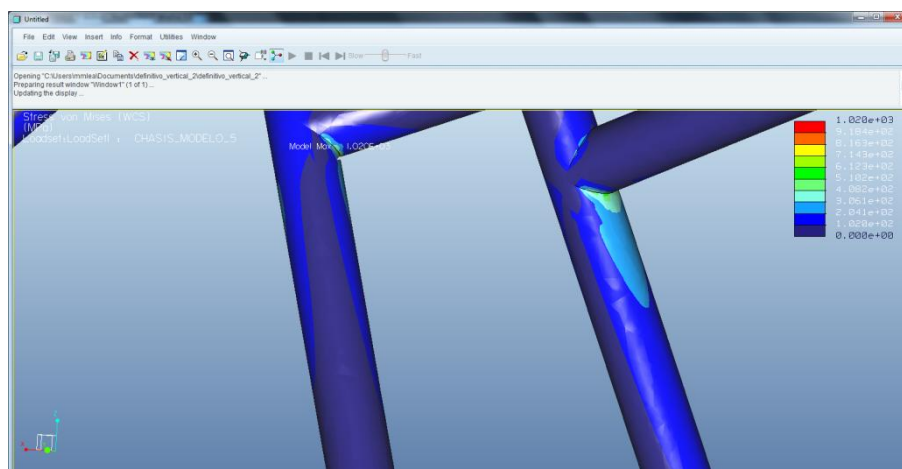


Figura 77: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 2

Por tanto, el diseño 2 no cumple con la normativa en cuanto a tensión se refiere debido a que sobrepasa el límite de rotura del material:

$$\sigma_{\text{vonmises}} = 1020 \text{ Mpa} > f_u = 680 \text{ Mpa}$$

Debido a que el diseño 2 no cumple la normativa, según el algoritmo de cálculo, se debe rediseñar el chasis nuevamente, introduciendo mejoras debidamente justificadas.

5.2.1.3 Diseño 3:

El diseño 3 incorpora, a continuación de los dos tubos anteriores, dos tubos más formando un triángulo con las barras que llegan a los semiarcos traseros, ya que uno de los requisitos de diseño era triangularizar la estructura. Los nuevos tubos están inclinados un ángulo de $51,3^\circ$ respecto al arco central de tal manera que conectan en el centro de las barras longitudinales traseras, punto donde posteriormente irán sujetos los amortiguadores del vehículo, una vez fabricado. La figura 78 muestra el resultado:

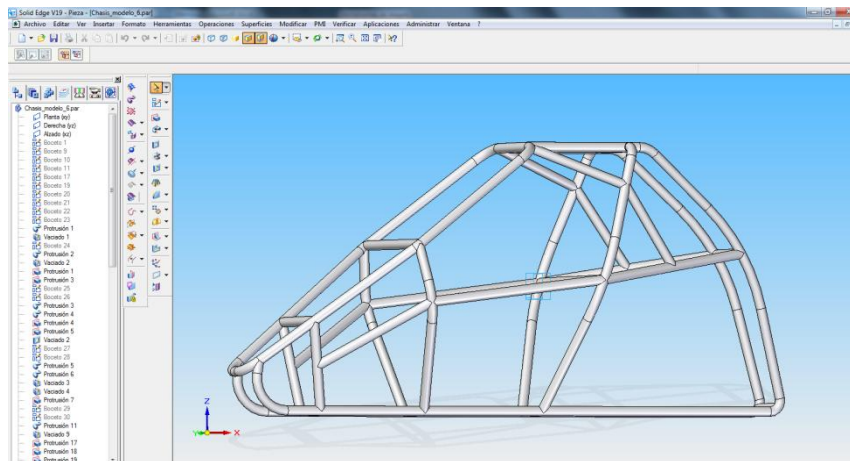


Figura 78: Diseño 3 en SEV19

En la figura 79 se muestra el resultado previo al análisis, para observar cómo se han situado las cargas y restricciones:

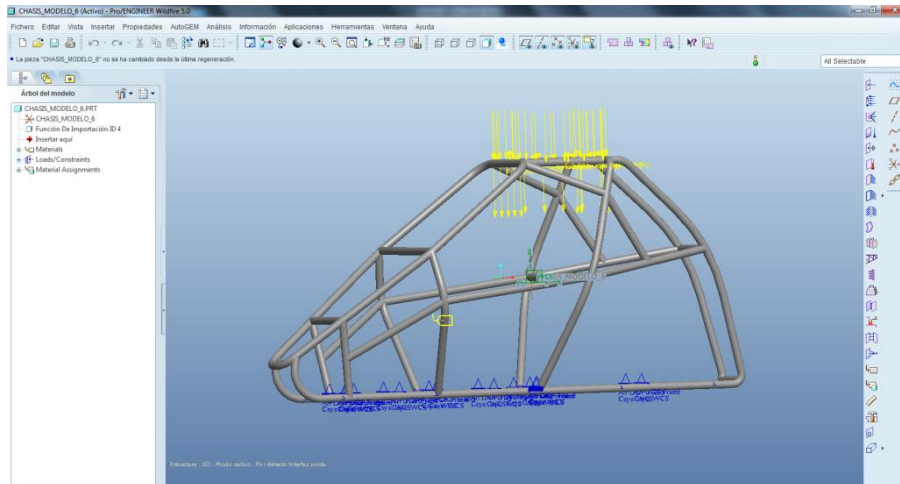


Figura 79: Diseño 3 antes de analizar

En la figura 79 se puede ver que las cargas y restricciones no varían con respecto al diseño anterior ya que el análisis es el mismo.

A continuación se realiza el análisis del nuevo diseño y los resultados obtenidos son:

- **Desplazamientos en el eje Z:**

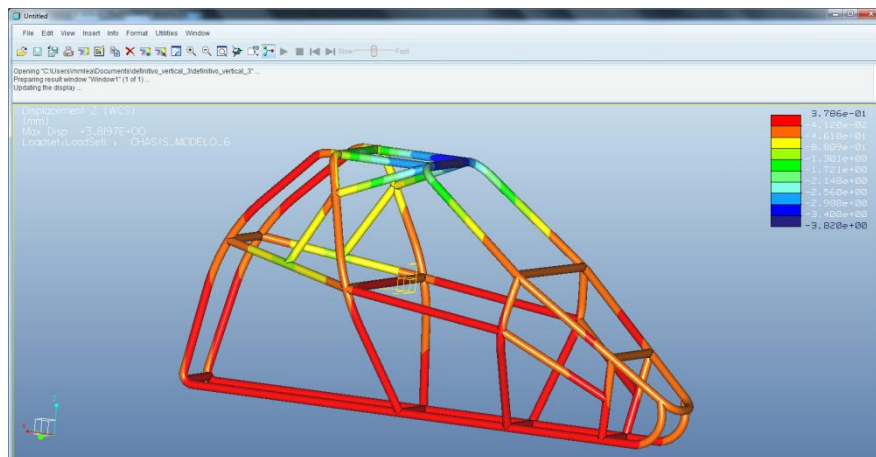


Figura 80: Desplazamientos en el eje Z del Diseño 3

La figura 80 muestra el desplazamiento máximo del chasis, el cual se localiza en la parte superior de la estructura (tiene signo negativo porque la fuerza esta aplicada en sentido negativo del eje Z) con un valor de 3,819 mm, inferior al límite, cuyo valor es de 50 mm para este análisis.

Por tanto, el diseño 3 cumple la normativa en cuanto a desplazamiento se refiere debido a:

$$\delta_{\text{eje Z}} = 3,819 \text{ mm} < \delta_{\text{límite}} = 50 \text{ mm}$$

- **Tensiones en el eje Z:**

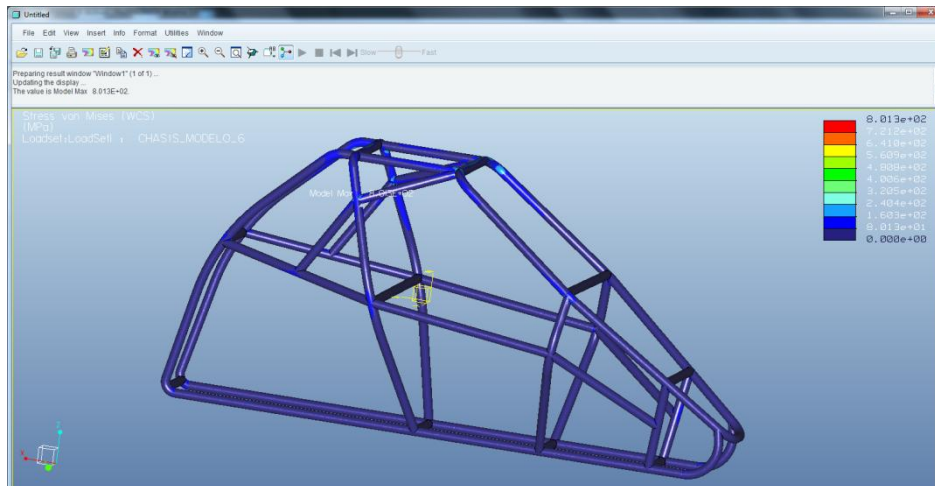


Figura 81: Tensión de Von Mises del Diseño 3

La figura 81 muestra la tensión de Von Mises máxima del diseño 3, la cual se localiza en la unión de los nuevos tubos con el arco central de la estructura. Esta tensión tiene un valor de 801,3 Mpa, inferior a la tensión de Von Mises del diseño 2, pero superior al límite de rotura del acero, cuyo valor es de 680 Mpa.

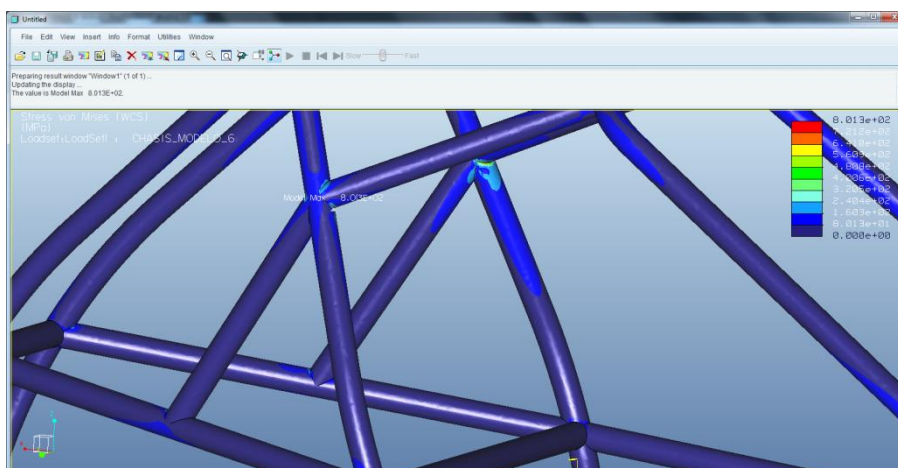


Figura 82: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 3

Por tanto, el diseño 3 no cumple con la normativa en cuanto a tensión se refiere debido a:

$$\sigma_{\text{vonmises}} = 801,3 \text{ Mpa} > f_u = 680 \text{ Mpa}$$

Debido a que el diseño 3 no cumple la normativa, según el algoritmo de cálculo, se debe rediseñar el chasis nuevamente, introduciendo mejoras debidamente justificadas.

5.2.1.4 Diseño 4:

El diseño 4 incorpora dos tubos de tal forma que se triangulariza el arco delantero. Los nuevos tubos están inclinados un ángulo de $16,5^\circ$, ángulo que no impide la evacuación del piloto en caso de accidente. La figura 83 muestra el resultado:

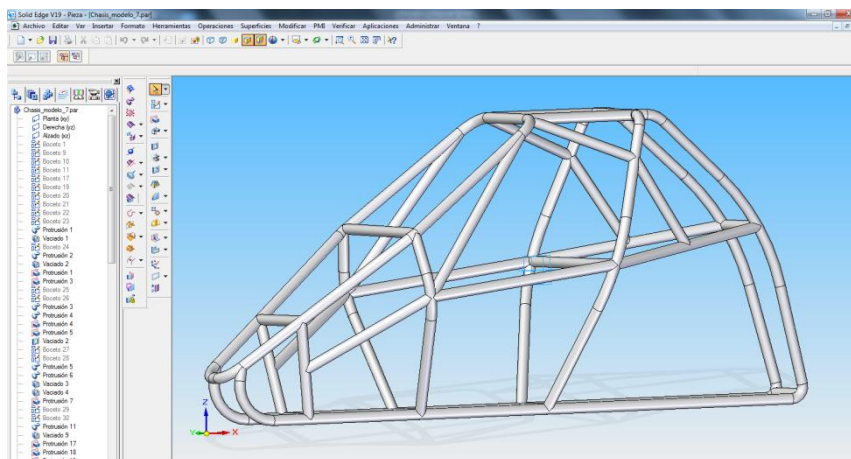


Figura 83: Diseño 4 en SEV19

En la figura 84 se muestra el resultado previo al análisis, para observar cómo se han situado las cargas y restricciones:

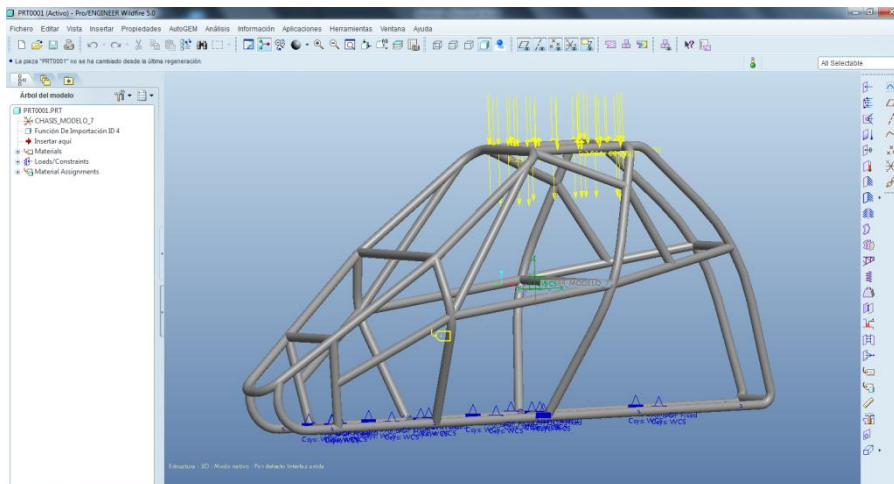


Figura 84: Diseño 4 antes de analizar

En la figura 84 se puede ver que las cargas y restricciones no varían con respecto al diseño anterior ya que el análisis es el mismo.

A continuación se realiza el análisis del nuevo diseño y los resultados obtenidos son:

- **Desplazamientos en el eje Z:**

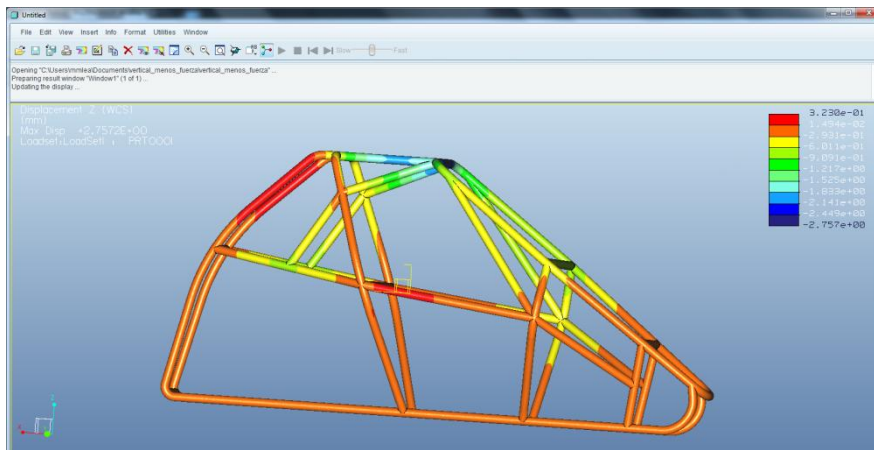


Figura 85: Desplazamientos en el eje Z del Diseño 4

La figura 85 muestra el desplazamiento máximo en el eje Z, cuyo valor se localiza en la parte superior de la estructura (tiene signo negativo porque la fuerza esta aplicada en sentido negativo del eje Z) con un valor de 2,75 mm, inferior al límite, cuyo valor es de 50 mm para este análisis.

Por tanto, el diseño 4 cumple la normativa en cuanto a desplazamiento se refiere debido a:

$$\delta_{\text{eje } z} = 2,75 \text{ mm} < \delta_{\text{límite}} = 50 \text{ mm}$$

- **Tensiones:**

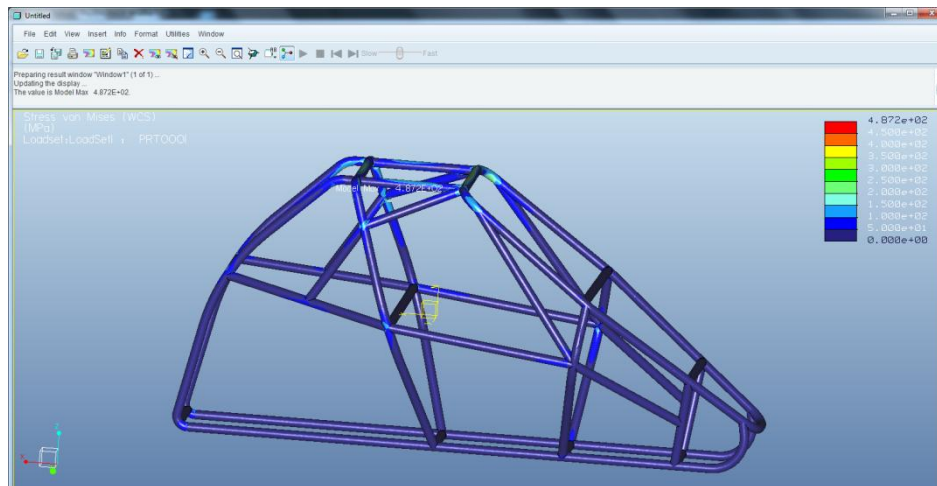


Figura 86: Tensión de Von Mises del Diseño 4

La figura 86 muestra la tensión de Von Mises máxima del diseño 4, la cual se localiza en la unión de los nuevos tubos con el arco central de la estructura. Esta tensión tiene un valor de 487,2 Mpa, inferior a la tensión de Von Mises del diseño 3 e inferior al límite de rotura del acero, cuyo valor es de 680 Mpa.

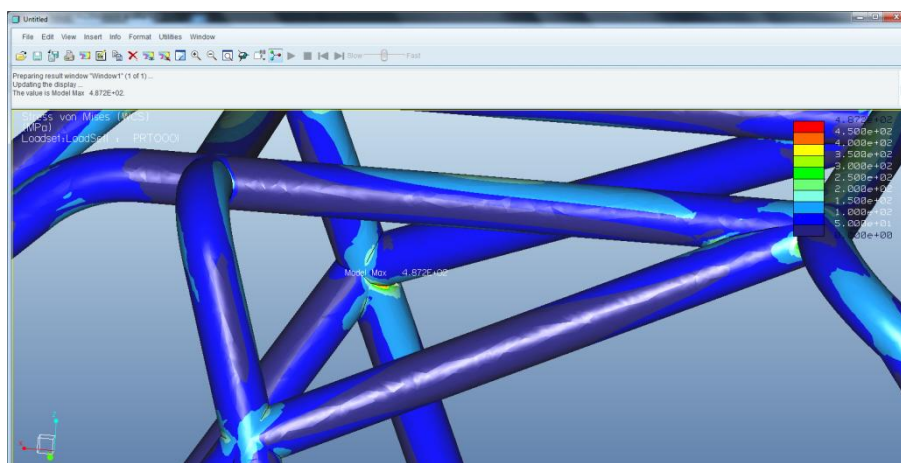


Figura 87: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 4



Por tanto, el diseño 4 cumple con la normativa en cuanto a tensión se refiere debido a que la tensión máxima no supera el límite de rotura del material, aunque sufre deformación plástica porque supera el límite elástico del material, cuyo valor es de 355 MPa:

$$\sigma_{\text{vonmises}} = 487,2 \text{ Mpa} < f_u = 680 \text{ Mpa}$$

Debido a que el diseño 4 cumple la normativa, según el algoritmo de cálculo, se debe pasar al siguiente análisis para verificar que también lo cumple.

5.2.2 Análisis de carga longitudinal.

El diseño 4 será el punto de partida de este análisis ya que los diseños anteriores han sido descartados por no cumplir el análisis de carga vertical.

La normativa exige que el análisis de carga longitudinal se divida en dos, es decir, que se analice la estructura en ambos sentidos del eje longitudinal, que para este caso coincide con el eje X. Por tanto, para llevar a cabo este análisis, se ha decidido empotrar los semiarcos traseros y aplicar la carga en la parte delantera, con dirección del eje X y con ambos sentidos, es decir, primero con las flechas de carga mirando al empotramiento y después hacia el lado opuesto. Las características de este análisis son:

Solicitud: $6P = 6 \times 4380,6 \text{ N} = 26283,6 \text{ N}$, de signo positivo y negativo.

Resistencia: La estructura no debe llegar a la rotura, es decir, la tensión máxima alcanzada en el análisis no debe alcanzar el límite de rotura (f_u) para el acero S 355 J2H ni debe tener una deformación bajo carga inferior a 100 mm medidos a lo largo del eje X, ya que es el eje de aplicación de la carga.

5.2.2.1 Diseño 4:

5.2.2.1.1 Carga positiva.

En la figura 88 se muestra el resultado previo al análisis longitudinal del diseño 4, para observar cómo se han situado las cargas y restricciones:

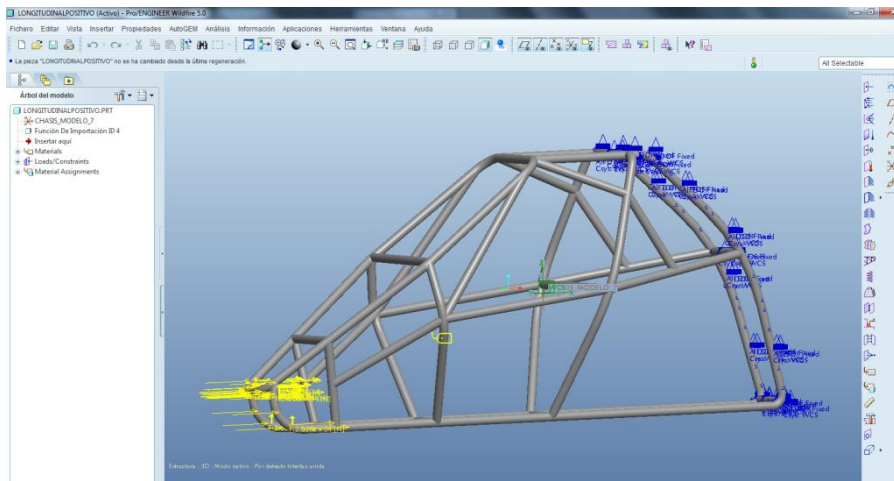


Figura 88: Diseño 4 antes de analizar en longitudinal positivo

En la figura 88 se puede ver que las cargas tienen la dirección del eje X con sentido positivo y las restricciones del modelo se encuentran en los semiarcos traseros. Con esta disposición se consigue modelizar el análisis longitudinal positivo.

A continuación se realiza el análisis del diseño 4 y los resultados obtenidos son:

- **Desplazamientos en el eje X:**

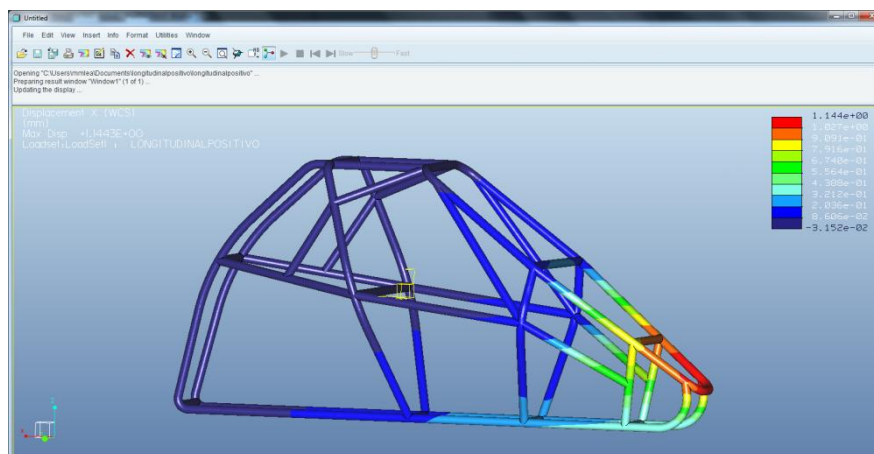


Figura 89: Desplazamientos en el eje X del Diseño 4 positivo

La figura 89 muestra los desplazamientos en el eje X. El máximo se localiza en la parte delantera de la estructura (tiene signo positivo porque la fuerza esta aplicada en sentido positivo del eje X) con un valor de 1,14 mm, inferior al límite, cuyo valor es de 100 mm para este análisis.

Por tanto, el diseño 4 cumple la normativa en cuanto a desplazamiento se refiere debido a:

$$\delta_{\text{eje X}} = 1,14 \text{ mm} < \delta_{\text{límite}} = 100 \text{ mm}$$

- **Tensiones:**

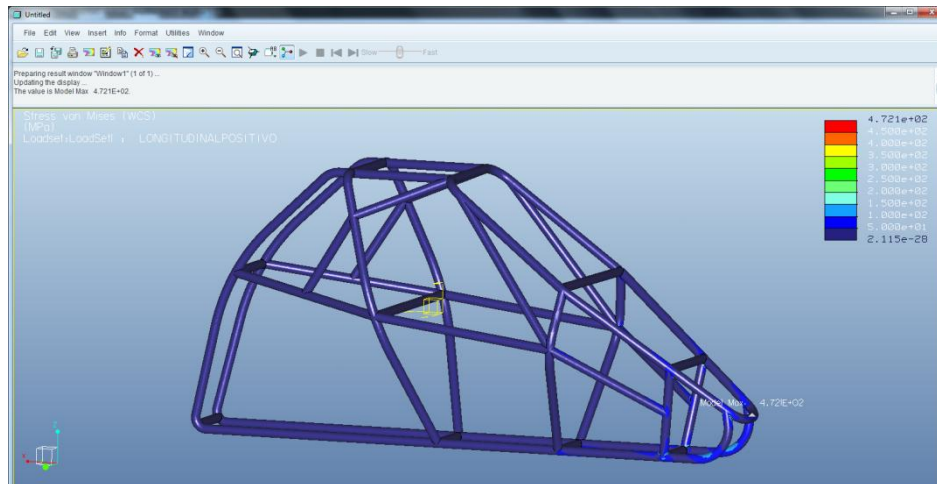


Figura 90: Tensión de Von Mises del Diseño 4 positivo

La figura 90 muestra la tensión de Von Mises del diseño 4. El máximo se localiza en la unión de los tubos curvos delanteros con el arco delantero de la estructura. Esta tensión tiene un valor de 472,1 Mpa, inferior al límite de rotura del acero, cuyo valor es de 680 Mpa.

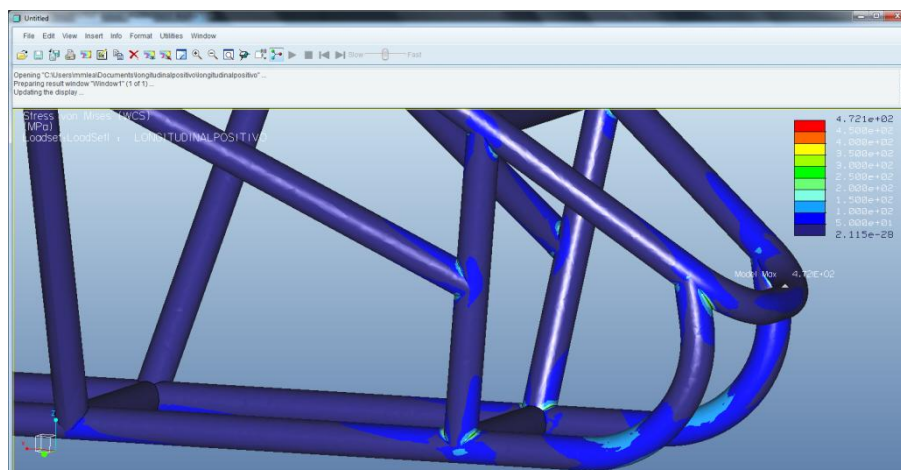


Figura 91: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 4 positivo

Por tanto, el diseño 4 cumple con la normativa en cuanto a tensión se refiere debido a que la tensión máxima no supera el límite de rotura del material, aunque sufre deformación plástica porque supera el límite elástico del material, cuyo valor es de 355 MPa:

$$\sigma_{\text{vonmises}} = 472,1 \text{ Mpa} < f_u = 680 \text{ Mpa}$$

Debido a que el diseño 4 cumple la normativa, según el algoritmo de cálculo, se debe pasar al siguiente análisis para verificar que también le cumple.

5.2.2.1.2 Carga negativa.

En la figura 92 se muestra el resultado previo al análisis longitudinal del diseño 4, para observar cómo se han situado las cargas y restricciones:

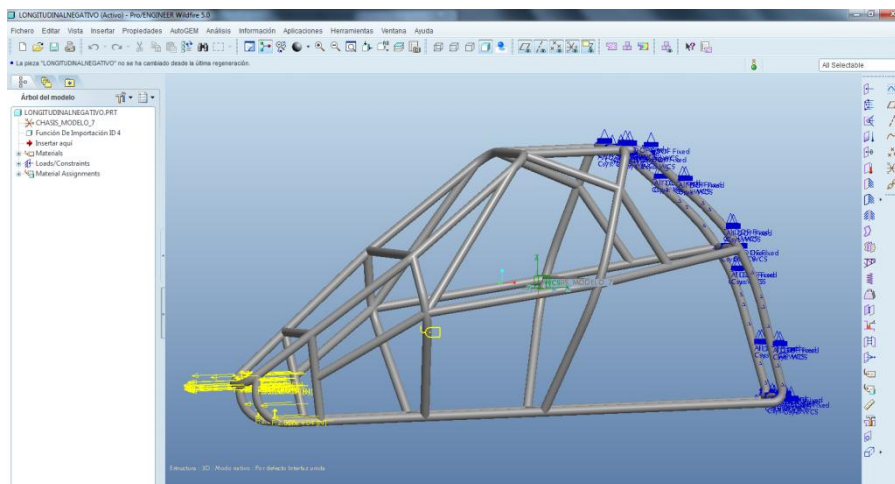


Figura 92: Diseño 4 antes de analizar en longitudinal negativo

En la figura 92 se puede ver que las cargas tienen la dirección del eje X con sentido negativo y las restricciones del modelo se encuentran en los semiarcos traseros. Con esta disposición se consigue modelizar el análisis longitudinal negativo.

A continuación se realiza el análisis del diseño 4 y los resultados obtenidos son:

- **Desplazamientos en el eje X:**

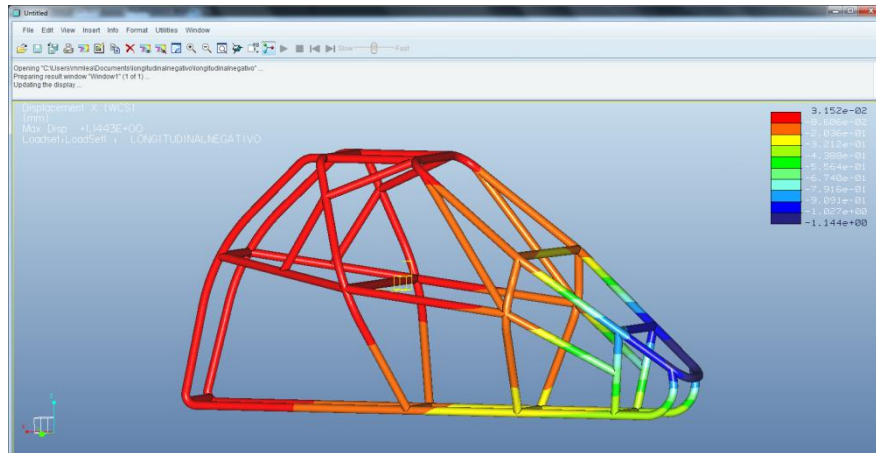


Figura 93: Desplazamientos en el eje X del Diseño 4 negativo

La figura 93 muestra el desplazamiento máximo en el eje X, el cual se localiza en la parte delantera de la estructura (tiene signo negativo porque la fuerza está aplicada en sentido negativo del eje X) con un valor de 1,14 mm, inferior al límite de deformación, cuyo valor es de 100 mm para este análisis.

Por tanto, el diseño 4 cumple la normativa en cuanto a desplazamiento se refiere debido a:

$$\delta_{\text{eje X}} = 1,14 \text{ mm} < \delta_{\text{límite}} = 100 \text{ mm}$$

- **Tensiones:**

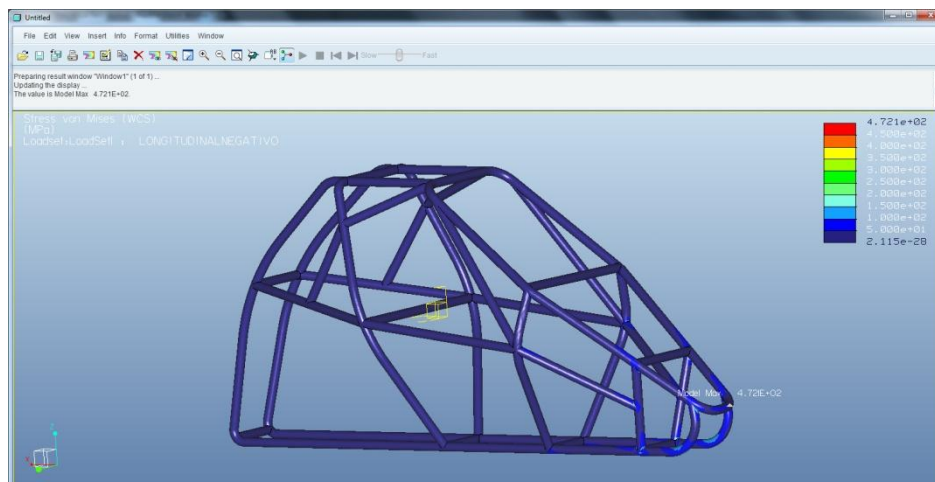


Figura 94: Tensión de Von Mises del Diseño 4 negativo

La figura 94 muestra la tensión de Von Mises del diseño 4. El máximo se localiza en la unión de los tubos curvos delanteros con el arco delantero de la estructura. Esta tensión tiene un valor de 472,1 Mpa, inferior al límite de rotura del acero, cuyo valor es de 680 Mpa.

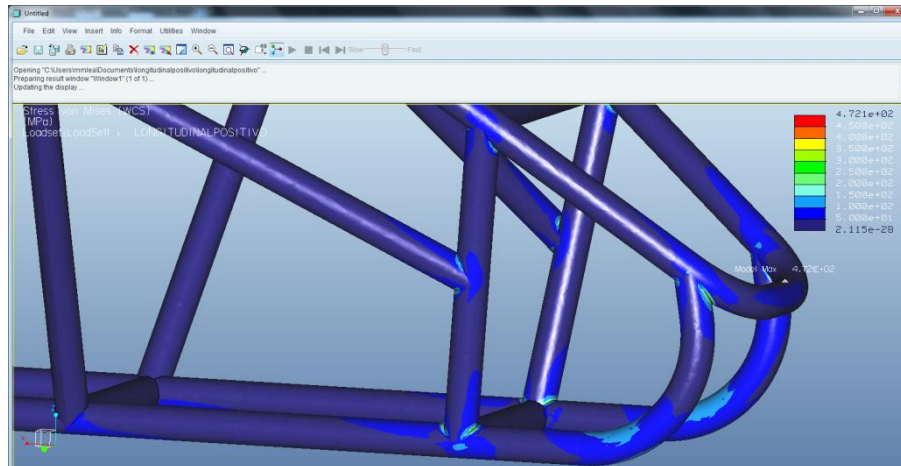


Figura 95: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 4 negativo

Por tanto, el diseño 4 cumple con la normativa en cuanto a tensión se refiere debido a que la tensión máxima no supera el límite de rotura del material, aunque sufre deformación porque supera el límite elástico del material, cuyo valor es de 355 MPa:

$$\sigma_{\text{vonmises}} = 472,1 \text{ Mpa} < f_u = 680 \text{ Mpa}$$

Debido a que el diseño 4 cumple la normativa, según el algoritmo de cálculo, se debe pasar al siguiente análisis para verificar que también le cumple.

5.2.3. Análisis de carga lateral.

Nuevamente, el diseño 4 será el punto de partida de este análisis ya que los diseños anteriores han sido descartados por no cumplir el análisis de carga vertical.

Para llevar a cabo este análisis, se ha decidido empotrar las barras laterales de un lado del vehículo y aplicar la carga en el otro lado, con dirección del eje Y y sentido positivo, es decir, con las flechas de la carga mirando hacia el empotramiento. Las características de este análisis son:

Solicitud: $2P = 2 \times 4380,6 \text{ N} = 8761,2 \text{ N}$, de signo positivo a lo largo del eje Y.

Resistencia: La estructura no debe llegar a la rotura, es decir, la tensión máxima alcanzada en el análisis no debe alcanzar el límite de rotura (f_u) para el acero S 355 J2H ni debe tener una deformación bajo carga inferior a 50 mm medidos a lo largo del eje Y, ya que es el eje de aplicación de la carga.

5.2.3.1 Diseño 4:

En la figura 96 se muestra el resultado previo al análisis lateral del diseño 4, para observar cómo se han situado las cargas y restricciones:

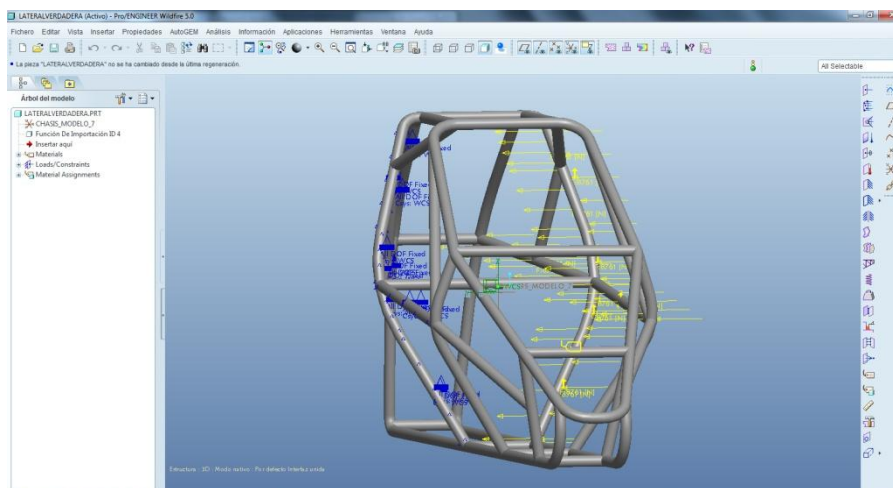


Figura 96: Diseño 4 antes de analizar lateral

En la figura se puede ver que las cargas tienen la dirección del eje Y con sentido positivo y las restricciones del modelo se encuentran en el lado contrario a las cargas. Con esta disposición se consigue modelizar el análisis lateral.

A continuación se realiza el análisis del diseño 4 y los resultados obtenidos son:

- **Desplazamiento en el eje Y:**

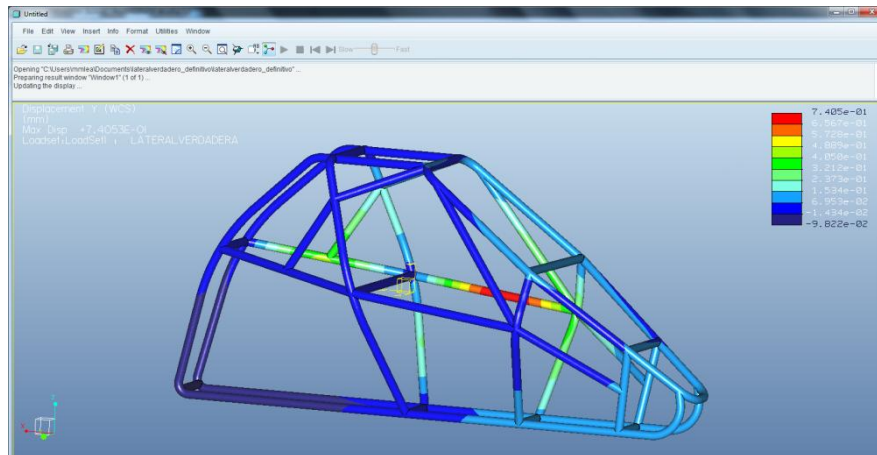


Figura 97: Desplazamientos en el eje X del Diseño 4 lateral

La figura 97 muestra el desplazamiento máximo en el eje Y, el cual se localiza en la parte donde está aplicada la fuerza (tiene signo positivo porque la fuerza esta aplicada en sentido positivo del eje Y) con un valor de 0,74 mm, inferior al límite de deformación, cuyo valor es de 50 mm para este análisis.

Por tanto, el diseño 4 cumple la normativa en cuanto a deformación se refiere debido a:

$$\delta_{\text{eje Y}} = 0,74 \text{ mm} < \delta_{\text{límite}} = 50 \text{ mm}$$

- **Tensiones:**

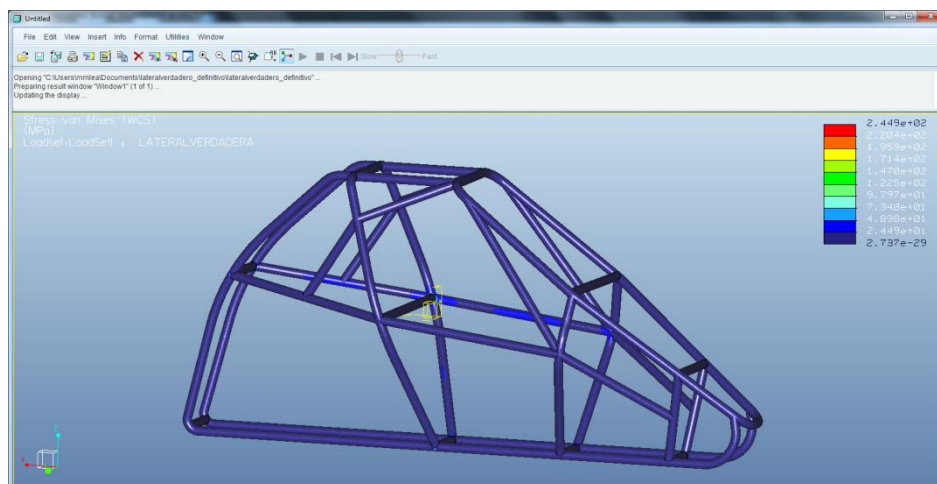


Figura 98: Tensión de Von Mises del Diseño 4 lateral

La figura 98 muestra la tensión de Von Mises del diseño 4. Esta tensión tiene un valor máximo de 244,9 Mpa, inferior al límite de rotura del acero (680 MPa) e inferior al límite elástico (355 MPa). Esta tensión máxima está localizada en la unión de las barras longitudinales con el arco central.

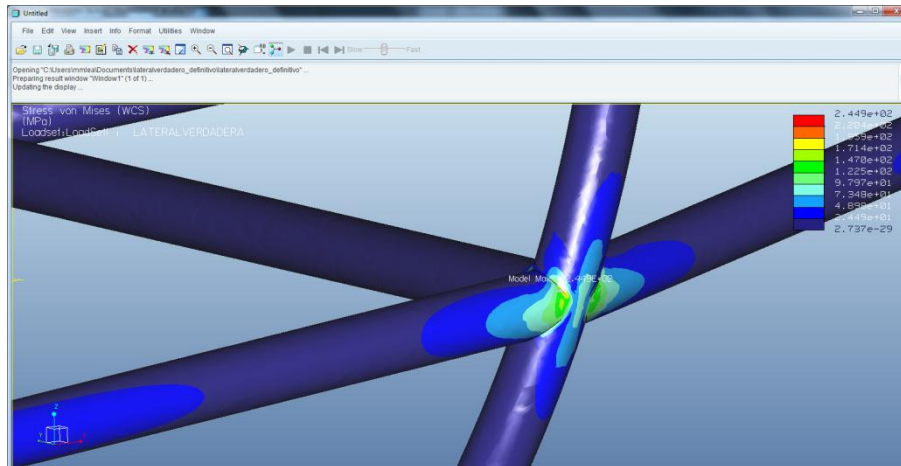


Figura 99: Detalle de la tensión de Von Mises del Diseño 4 lateral

Por tanto, el diseño 4 cumple con la normativa en cuanto a tensión se refiere debido a:

$$\sigma_{\text{vonmises}} = 244,9 \text{ Mpa} < f_u = 680 \text{ Mpa}$$

Debido a que el diseño 4 cumple la normativa en cada uno de los análisis, se puede afirmar que:

“El diseño 4 es apto para ser homologado teniendo en cuenta la normativa [6] en base a este estudio”

5.3. Solución final:

A continuación se representan diferentes vistas de la estructura final, validada según los estudios anteriores:

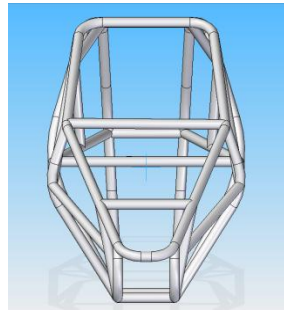


Figura 100: Vista de perfil delantero

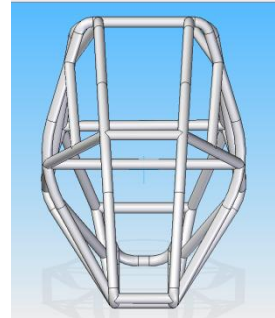


Figura 101: Vista de perfil trasero

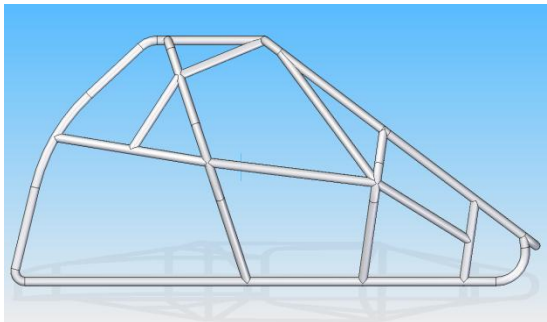


Figura 102: Vista de alzado

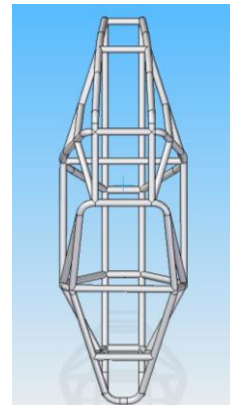


Figura 103: Vista de planta

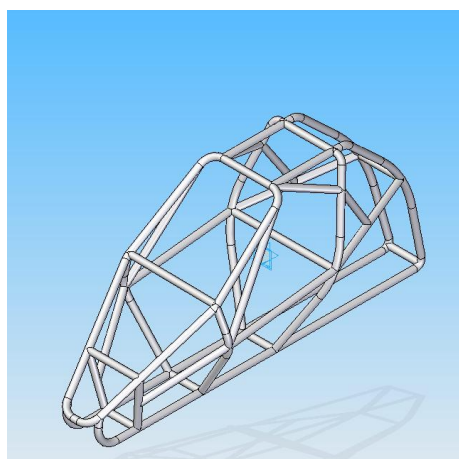


Figura 104: Vista isométrica



Una vez analizado el diseño final del chasis, es interesante conocer las propiedades físicas del mismo, ya que serán útiles en apartados sucesivos. La figura 105 muestra los resultados que genera Solid Edge:

Propiedades físicas

Sistema de coordenadas: Global Principales

Espacio modelo:

Material:

Nombre:

Densidad: 7,833 g/cm³

Precisión (de 0 a 1): 0,99

☐ Definidas por el usuario

Global **Principales**

Masa: 64,688 kg Volumen: 8258366,02 mm³ Área de superficie: 6584146,81 mm²

Centro de masa **Centro de volumen**

☒ Mostrar símbolo **cm** ☒ Mostrar símbolo **cv**

X: -142,09 mm Y: 0,27 mm Z: -37,85 mm

X: -142,09 mm Y: 0,27 mm Z: -37,85 mm

Momentos de inercia de la masa

Ixx: 130953564,493 Iyy: 389156054,564 Izz: 333360261,719 g

Ixy: -117649,448 g-c Iyz: 23307,362 g-c²

Figura 105: Tabla de propiedades del Diseño 4



CAPÍTULO 6:

Presupuesto



6. Presupuesto.

Nº.Ord	Descripción	Unidades	Precio (€)	Importe (€)
01	DISEÑO, ANÁLISIS Y FABRICACIÓN DE UN CHASIS DE CAR CROSS			
01.01	PRESUPUESTO DE INGENIERÍA			
	Estudio del proyecto, cálculos, etc.	38	25	950
01.02	Tasas ficha de homologación del carcass	1	80	80
	Total de la partida 01		1030 €	
02	PRESUPUESTO DE CALDERERÍA			
02.01	Cortar de los perfiles a medida	2	36	72
02.02	Curvar de los perfiles	3	36	108
02.03	Soldar perfiles	10	36	360
02.04	Preparar superficie y pintar	2,5	36	90
	Total de la partida 02		630 €	
03	MATERIALES			
03.01	Perfiles tubulares 40x2,5, conformado en frío de calidad S 355 J2H	30	3,04	91,2
03.02	Imprimación y pintura	1	70	70
	Total de la partida 03		161,2 €	
	SUMA TOTAL DE LAS PARTIDAS		1821,2 €	
	TOTAL PRESUPUESTO (18 % IVA)		2149 €	

Tabla 4: Presupuesto detallado



A continuación, se va a detallar el cálculo del precio del material:

- El peso del chasis es de 64,688 kg.
- La masa lineal para el perfil S 355 J2H de 40x2,5 conformado en frío es de 2,31 kg/m.
- La longitud total de tubo que se necesita para fabricar el chasis es de:

$$\text{Longitud}_{\text{total}} = \text{Peso} / \text{masa lineal}$$

$$\text{Longitud}_{\text{total}} = 64,688 \text{ kg} / 2,31 \text{ kg/m}$$

$$\text{Longitud}_{\text{total}} = 28,0034 \text{ metros}$$

- Los perfiles se reciben en longitudes de 6m. Por tanto, para un sólo chasis, basta con pedir 5 perfiles ya que son 30 metros en total, con lo que sobran 2 metros que serán útiles para posteriores chasis o para solventar errores en el corte, curvado, etc.
- El precio del perfil es de 3,04 euros/metro.



CAPÍTULO 7:

Conclusiones y trabajos futuros



7. Conclusiones y trabajos futuros.

7.1. Conclusiones.

Las conclusiones que se extraen del presente proyecto son:

- En primer lugar, decir que el uso de herramientas CAD (Solid Edge V19) y MEF (Pro Engineer W5) han permitido cumplir los objetivos establecidos, ya que se ha diseñado un chasis ligero, resistente y capaz de soportar los esfuerzos que exige la normativa [6]. Estos programas poseen una interfaz atractiva y sencilla para el usuario, lo que permite familiarizarse con ellos de manera rápida. Además, aproximan los diseños a la realidad con resultados fiables, lo cual permite fabricar un único diseño y sacarlo al mercado sin necesidad de hacer análisis experimentales ni prototipos, los cuales elevan notablemente los costes.
- En segundo lugar, destacar la ayuda que la normativa vigente en cuanto a homologación de estructuras de seguridad en vehículos carcass proporciona, ya que sin ella, sería muy difícil decidir si los resultados de un análisis son fiables o no.
- También citar que la documentación técnica que existe en cuanto a la competición carcass es escasa. Esta competición tiene varias décadas como citamos al principio del documento, pero a día de hoy, se trata de una competición desconocida para muchas personas.
- Por último, mencionar que las soluciones adoptadas en cada uno de los diseños así como sus posteriores remodelaciones han sido de vital importancia para poder llegar al diseño final, todas ellas debidamente justificadas en cuanto a prestaciones, mejoras, costes, etc.



7.2. Trabajos futuros.

En cuanto a los posibles trabajos futuros que puedan surgir a partir de este son:

- Realizar un estudio más completo, donde se incorporen análisis con comportamiento elastoplástico puro, análisis de fatiga, de los modos de vibración, la aerodinámica, etc., con el fin de acercar más a la realidad el estudio y ver de manera casi real el comportamiento de una estructura semejante.
- Completar el proyecto del chasis tipo carcass, incorporando nuevos estudios sobre amortiguación trasera y delantera, dirección, frenos, motor y transmisión, etc. Con ello se conseguiría tener un documento general que englobaría todas y cada una de las partes más importantes del vehículo.
- En línea con lo anterior, dar el paso de una competición como el carcass a la Formula SAE, competición en la que se requiere un vehículo mucho más sofisticado, donde todas y cada una de las soluciones adoptadas deben ir técnicamente justificadas, donde la aerodinámica, la fatiga, las vibraciones, etc., hasta ahora despreciadas, juegan un papel muy importante en el diseño de vehículos fórmula SAE.



CAPÍTULO 8:

Referencias



8. Referencias.

- [1] Josep Castañé. *El equipo de competición*. Editorial CEAC 1996.
- [2] Callister William D. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Reverté S.A. 2005.
- [3] Roger Toogood, Ph.D. *Pro Engineer Wildfire 5.0 Mechanics Tutorial*. Schroff Development Corp, 2009.
- [4] Meneses Alonso, J; Álvarez Caldas, C; Rodríguez Fernández, S. *Introducción al Solid Edge*. Paraninfo 2006.
- [5] DB-SE A: *Documento Básico de Seguridad Estructural – Acero*.
- [6] Reglamento técnico de carcass de la RFEDA, con su Anexo I: *Estructuras Antivuelco. Requisitos para su homologación*.
- [7] LT12: *Lista técnica sobre Asientos homologados según la norma 8855-1999 (21/07/2010)*.
- [8] LT24: *Lista técnica de Arnéses homologados según la normativa FIA 8853-98 y 8854-98 (09/03/10)*.
- [9] LT25: *Lista técnica de normas reconocidas para cascos (12/03/10)*.
- [10] LT27: *Lista técnica de ropa de protección homologada según la norma FIA 8856-2000 (26/07/10)*.
- [11] LT29: *Lista técnica de sistemas HANS aprobados según la norma FIA 8858-2002 (28/05/10)*.
- [12] *Examen médico de aptitud para la obtención de la licencia 2010*.
- [13] *Catálogo perfiles tubulares y lista de precios de Condesa®, según la norma UNE-EN 10219*.
- [14] <http://www.car-cross.com/> (22/09/2010)
- [15] <http://www.ptc.com/products/proengineer/> (18/09/2010)



- [16] Estándar de calidad Snell 2000/2005
- [17] Arias Paz, M. Manual de automóviles. CIE DOSSAT 2008.
- [18] Apuntes UC3M Resistencia de Materiales
- [19] <http://www.km77.com/> (22/09/2010)
- [20] <http://www.3a.com.pe/ManualSoldaduraexsa.pdf> (25/09/2010)



ANEXO I:

Planos